



TESIS - TE142599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN TEORI p - q PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL

MOH. JAUHARI
NRP. 2215201010

DOSEN PEMBIMBING
DEDET CANDRA RIAWAN, ST., M.ENG., PH.D.
PROF. IR. MOCHAMAD ASHARI, M.ENG., PH.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN TEORI p - q PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL

MOH. JAUHARI
NRP. 2215201010

DOSEN PEMBIMBING
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ACTIVE POWER FILTER COUPLED PHOTOVOLTAIC BASED ON p - q THEORY UNDER NONIDEAL MAINS VOLTAGES

MOH. JAUHARI
NRP. 2215201010

SUPERVISOR
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Moh. Jauhari
NRP. 2215201010

Tanggal Ujian : 9 Januari 2017
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh:

1. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP: 197311192000031001

(Pembimbing I)

2. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
NIP: 196510121990031003

(Pembimbing II)

3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP: 194907151974121001

(Penguji)

4. Dr. Ir. Soedibyo, MMT.
NIP: 195512071980031004

(Penguji)

5. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP: 197411292000121001

(Penguji)

an, Direktur Program Pascasarjana
Asisten Direktur

Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.
NIP. 19611021 198603 1 001

Direktur Program Pascasarjana

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D.
NIP. 196012021987011001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN TEORI $p-q$ PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 20 Januari 2017

Moh. Jauhari

NRP. 2215201010

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN TEORI p-q PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL

Nama mahasiswa : Moh. Jauhari
NRP : 2215201010
Pembimbing : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
: Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Fenomena harmonisa dalam sistem kelistrikan merupakan permasalahan yang sering terjadi. Oleh karena itu, mitigasi harmonisa perlu diperhatikan agar dampak negatif dari harmonisa dapat dikurangi. Filter aktif harmonisa merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mereduksi arus harmonisa. Pada penelitian ini dikembangkan filter aktif terkopel fotovoltaik pada kondisi tegangan tidak ideal. Topologi filter aktif terkopel fotovoltaik terdiri dari *Voltage Source Inverter* (VSI) dengan sisi tegangan searah *Direct Current* (DC) diparalel dengan fotovoltaik.

Filter aktif akan menyuplai arus anti harmonisa dan daya reaktif ke jala-jala. Arus anti harmonisa akan digunakan untuk mengeliminasi arus harmonisa pada jala-jala. Fotovoltaik akan menyuplai daya aktif ke jala-jala melalui pengaturan DC-bus VSI. Normalisasi tegangan tidak ideal dilakukan dengan menggunakan *Phase Lock Loop* (PLL) untuk mendeteksi sudut fasa. sudut fasa ini kemudian digunakan untuk membangkitkan sinyal tegangan tiga fasa. sinyal tegangan tiga fasa hasil normalisi ini kemudian digunakan dalam perhitungan teori p-q untuk membangkitkan arus anti harmonisa dalam kondisi tegangan tidak ideal.

Hasil dari penelitian ini mampu mengurangi kandungan harmonisa, *Total Harmonic Distortion* (THD), dari 28.34% menjadi 2.26% pada pengujian ratting desain yang digunakan. Pada penelitian ini hasil analisa data menggunakan software Matlab. Dan untuk implementasinya menggunakan mikrokontroler.

Kata kunci: filter aktif terkopel fotovoltaik, *Voltage Source Inverter* (VSI), teori p-q, tegangan tidak ideal, *Phase Lock Loop* (PLL), mikrokontroler.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ACTIVE POWER FILTER COUPLED PHOTOVOLTAIC BASED ON p-q THEORY UNDER NONIDEAL MAINS VOLTAGES

By : Moh. Jauhari
Student Identity Number : 2215201010
Supervisor(s) : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
: Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

The phenomenon of harmonics in electrical systems is a problem that often occurs. Therefore, mitigation of harmonics is necessary so that the negative effects of harmonics can be reduced. Active power filters is one method that can be used to reduce harmonic distortion. In this research, the development of active power filter coupled photovoltaic under nonideal mains voltages. The active power filter topology consists of a Voltage Source Inverter (VSI) arranged in parallel with photovoltaic.

Active power filters will supply anti harmonic currents and reactive power into the grid. Anti harmonic currents will be used to eliminate harmonic currents in the grid. Photovoltaics will supply the active power to grid by controlling the DC-bus VSI. Voltage normalization under nonideal voltage is done using Phase Lock Loop (PLL) to detect the phase angle. The phase angle is then used to generate three-phase voltage signals. The three-phase voltage signal normalization results are then used in the calculation of p-q theory to generate anti harmonic currents under nonideal voltage.

The results of this study were able to reduce the harmonic content, Total Harmonic Distortion (THD), from 28.34% to 2.26% in the test design that used. In this study, the data analysis obtained using Matlab software. And for implementation using microcontroller.

Key words: active power filter coupled photovoltaic, Voltage Source Inverter (VSI), p-q theory, Nonideal Voltage, Phase Lock Loop (PLL), microcontroller.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tesis ini dapat terselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tesis dengan judul: **“Desain dan Implementasi Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik Menggunakan Teori p-q pada Kondisi Tegangan tidak Ideal”** ini dilaksanakan guna memenuhi salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Magister Teknik. Laporan Tesis ini disusun berdasarkan pembelajaran yang diperoleh selama kuliah melalui pembimbing maupun studi literatur yang tersedia.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Aba Hadrowi, Umami Amina, *Le' Qiqin*, *Le' Sodik* dan seluruh keluarga yang telah banyak memberikan motivasi dan doa.
2. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS serta seluruh dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu selama proses perkuliahan.
4. Teman-teman di laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan Tesis ini.
5. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) selaku pemberi beasiswa Tesis dan Desertasi sehingga penelitian tesis ini dapat berjalan dengan lancar.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan menjadi kebaikan bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, 20 Januari 2016

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Kontribusi Penelitian	3
BAB 2 FILTER AKTIF PADA SISTEM FOTOVOLTAIK TERHUBUNG JALA-JALA.....	5
2.1 Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik	5
2.2 Sistem Kontrol Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik Menggunakan Teori p-q	7
2.3 Performansi Teori p-q pada Pembangkitan Arus Referensi Filter Aktif.....	9
BAB 3 SIMULASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL.....	11

3.1 Strategi Pembangkitan Arus Referensi Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik pada Kondisi Tegangan tidak Ideal.....	11
3.2 Simulasi Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik pada Kondisi Tegangan Tidak Ideal.....	12
3.2.1 Daya Aktif dan Reaktif pada Sistem Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik.....	13
3.2.2 Tegangan Sisi DC pada Sistem Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik	14
3.2.3 Simulasi pada Kondisi Tegangan tidak Ideal.....	15
3.2.4 Simulasi pada Kondisi Tegangan tidak Seimbang.....	17
3.2.5 Simulasi pada Kondisi Tegangan Terdistorsi	21
3.3 Efektivitas Filter Aktif Terkopel Terhadap Injeksi Daya Aktif Fotovoltaik.....	24
BAB 4 PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PEMBANGKIT ARUS REFERENSI FILTER AKTIF	29
4.1 Spesifikasi Perangkat Keras Pembangkit Arus Referensi Filter Aktif	29
4.2 Implementasi Pembangkit Arus Referensi Filter Aktif ..	29
4.2.1 Desain Sensor.....	29
4.2.2 Mikrokontroler.....	30
4.3 Pengujian Gelombang Keluaran Pembacaan Sensor.....	32
4.4 Pengujian Pembangkitan Arus Referensi Filter Aktif....	33
BAB 5 PENUTUP	39
5.1. Kesimpulan	39
5.2. Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	43
INDEKS	47
BIOGRAFI PENULIS	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konfigurasi filter aktif terkopel fotovoltaik	5
Gambar 2.2	Topologi konverter kuadratik	6
Gambar 2.3	Block diagram perhitungan teori p-q.....	9
Gambar 3.1	Konfigurasi APF+PV dengan perhitungan teori p-q pada kondisi tegangan tidak ideal.....	11
Gambar 3.2	Kurva hubungan daya aktif antara sumber, beban dan APF+PV	14
Gambar 3.3	Kurva hubungan daya reaktif antara sumber, beban dan APF+PV	14
Gambar 3.4	Tegangan sisi DC APF+PV	15
Gambar 3.5	Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber ideal	15
Gambar 3.6	THD arus sumber sebelum dikompensasi	16
Gambar 3.7	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF	16
Gambar 3.8	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV	17
Gambar 3.9	Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber seimbang	18
Gambar 3.10	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF pada kondisi tegangan tidak seimbang.....	18
Gambar 3.11	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV pada kondisi tegangan tidak seimbang	19
Gambar 3.12	Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber tidak seimbang dengan normalisasi tegangan sumber.....	19
Gambar 3.13	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan tidak seimbang	20
Gambar 3.14	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV dengan normalisasi tegangan pada kondisi tegangan tidak seimbang	20

Gambar 3.15	Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber terdistorsi	21
Gambar 3.16	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF pada kondisi tegangan terdistorsi	22
Gambar 3.17	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV pada kondisi tegangan terdistorsi	22
Gambar 3.18	Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber terdistorsi dengan normalisasi tegangan sumbe.....	23
Gambar 3.19	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan terdistorsi	23
Gambar 3.20	THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan terdistorsi	24
Gambar 3.21	Hasil simulasi pada saat arus sumber mendekati nol.....	25
Gambar 3.22	THD arus sumber pada saat arus sumber mendekati nol	26
Gambar 3.23	Hasil simulasi pada saat injeksi daya fotovoltaiik pada jala-jala.....	26
Gambar 3.24	THD arus sumber pada saat injeksi daya fotovoltaiik pada jala-jala	27
Gambar 3.25	Grafik efektivitas filter aktif terkopel fotovotaik terhadap injeksi daya aktif fotovoltaiik.....	27
Gambar 4.1	Block diagram pembangkit arus referensi filter aktif	29
Gambar 4.2	Permrograman STM32F4 menggunakan MATLAB	30
Gambar 4.3	Pembangkit arus referensi filter aktif.....	31
Gambar 4.4	Proses pengujian pembangkit arus referensi filter aktif..	31
Gambar 4.5	Hasil pembacaan sensor gelombang tegangan tiga fasa .	32
Gambar 4.6	Hasil pembacaan sensor gelombang arus sumber tiga fasa dengan pembebanan penyearah 6-pulsa	32
Gambar 4.7	Bentuk gelombang arus sumber sebelum dikompensasi.	33
Gambar 4.8	THD arus sumber hasil implementasi sebelum dikompensasi.....	34

Gambar 4.9	Bentuk gelombang arus. Chanel 1 arus sumber setelah dikompensasi. Chanel 2 arus kompensasi atau arus referensi	34
Gambar 4.10	THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi	35
Gambar 4.11	Gelombang tegangan tiga fasa tidak seimbang	35
Gambar 4.12	Bentuk gelombang arus pada kondisi tegangan tidak seimbang. Chanel 1 arus sumber setelah dikompensasi. Chanel 2 arus referensi	36
Gambar 4.13	THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi pada kondisi tegangan tidak seimbang	36
Gambar 4.14	Gelombang tegangan tiga fasa terdistorsi.....	37
Gambar 4.15	THD tegangan sumber yang terdistorsi.....	37
Gambar 4.16	Bentuk gelombang arus pada kondisi tegangan terdistorsi. Chanel 1 arus sumber setelah dikompensasi. Chanel 2 arus referensi	38
Gambar 4.17	THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi pada kondisi tegangan terdistorsi	38

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter simulasi filter aktif terkopel fotovoltaik.....	18
Tabel 4.1	Spesifikasi pembangkit arus referensi filter aktif.....	20

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

THD	= <i>Total Harmonic Distortion</i>
APF	= <i>Active Power Filter</i>
RMS	= <i>Root Mean Square</i>
PCC	= <i>Point of Common Coupling</i>
VSI	= <i>Voltage Source Inverter</i>
AC	= <i>Alternating Current</i>
DC	= <i>Direct Current</i>
PI	= <i>Propotional-Integral</i>
PID	= <i>Propotional-Integral-Derivatif</i>
LPF	= <i>Low Pass Filter</i>
PV	= Fotovoltaik
P_{PV}	= Daya aktif fotovoltaik
PLL	= <i>Phase Locked Loop</i>
FFT	= <i>Fast Fourier Transform</i>
K_p	= konstanta <i>gain</i> proporsional
K_i	= konstanta <i>gain</i> integral
V_a, V_b, V_c	= tegangan pada fasa a, b, dan c (koordinat <i>abc</i>)
i_a, i_b, i_c	= arus pada fasa a, b, dan c (koordinat <i>abc</i>)
i_a', i_b', i_c'	= arus sumber pada fasa a, b, dan c setelah dikompensasi
V_α, V_β	= tegangan pada koordinat $\alpha\beta$
i_α, i_β	= arus pada koordinat $\alpha\beta$
$i_{\alpha-ref}, i_{\alpha-ref}$	= arus referensi pada koordinat $\alpha\beta$
$i_{a-ref}, i_{b-ref}, i_{c-ref}$	= arus referensi pada koordinat <i>abc</i>
$V_{au+}, V_{bu+}, V_{cu+}$	= komponen tegangan tidak seimbang urutan positif
$V_{au-}, V_{bu-}, V_{cu-}$	= komponen tegangan tidak seimbang urutan negatif
$V_{af}, V_{bf}, V_{cf},$	= tegangan fundamental tiga fasa
V_{ah}, V_{bh}, V_{ch}	= komponen harmonisa tiga fasa

i_L	= arus beban
p	= daya aktif sesaat
P	= komponen DC dari daya sesaat p
$p\sim$	= komponen AC dari daya sesaat p
q	= daya reaktif sesaat
Q	= komponen DC dari daya sesaat q
$q\sim$	= komponen AC dari daya sesaat q
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	= arus kompensasi pada koordinat abc
R	= tahanan beban
f_s	= frekuensi pensaklaran
ΔV_{out}	= riak tegangan keluaran
ΔV_{C1}	= riak tegangan kapasitor C_1
C	= kapasitor filter aktif
C_{min}	= nilai minimal kapasitor filter aktif
V_{dc}	= tegangan sisi DC filter aktif
ΔV_{dc}	= riak tegangan sisi DC filter aktif

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan penggunaan peralatan elektronika daya sebagai antarmuka antara beban dan sistem kelistrikan berpengaruh pada kualitas daya listrik khususnya timbulnya harmonisa listrik [1]. Arus harmonisa dihasilkan oleh beban-beban tidak linier seperti penyearah, pengatur kecepatan motor, dan lain-lain. Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh beban tidak linier akan mempengaruhi kualitas daya pada sistem distribusi listrik dan performa peralatan-peralatan listrik.

Filter pasif merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mereduksi arus harmonisa. Filter pasif ini menggunakan kombinasi induktor dan kapasitor untuk menghilangkan frekuensi harmonisa yang telah ditentukan. Kelemahan dari filter pasif ini adalah kompensasi harmonisa yang diberikan bersifat tetap, sehingga tidak dapat menghilangkan frekuensi harmonisa selain yang telah ditentukan. Filter aktif (*Active Power Filter*, APF) memiliki kelebihan dapat mengeliminasi berbagai frekuensi harmonisa yang timbul. Pada filter aktif ini terdapat inverter dan kontroler untuk mengatur besaran kompensasi yang diberikan untuk mengeliminasi arus harmonisa yang timbul [2]. Dalam implementasi di lapangan, sumber tegangan sering kali tidak dalam kondisi sinusoidal murni sehingga sinyal tegangan yang akan digunakan oleh filter aktif perlu diatur terlebih dahulu. Kondisi ini juga disebut kondisi tegangan tidak ideal.

Perkembangan penggunaan energi terbarukan ramah lingkungan sangat berpengaruh pada bahasan kualitas daya listrik. Penelitian tentang energi terbarukan khususnya fotovoltaik (PV) yang terhubung jala-jala listrik mengalami perkembangan yang pesat terutama yang berkaitan dengan kualitas daya listrik [3].

Filter aktif terkopel fotovoltaik merupakan kombinasi sistem dari filter aktif dan sumber energi terbarukan yang dalam hal ini adalah fotovoltaik. Dengan sistem filter aktif terkopel fotovoltaik ini, filter aktif tidak hanya dapat mereduksi arus harmonisa tetapi juga dapat menyuplai daya aktif yang dibangkitkan oleh

fotovoltaik. Filter aktif terkopel fotovoltaik ini dapat dioperasikan pada kondisi tegangan sumber tidak ideal dengan normalisasi tegangan tidak ideal sebelum diolah oleh teori p-q yang digunakan untuk membangkitkan arus referensi.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini yang menjadi permasalahan utama adalah:

1. Perancangan pengatur arus referensi filter aktif terkopel fotovoltaik pada kondisi tegangan tidak ideal dengan menggunakan teori p-q.
2. Bagaimana pengaruh dan penanganan kondisi tegangan tidak ideal pada perhitungan teori p-q dalam pengaturan filter aktif.
3. Bagaimana pengaruh injeksi daya aktif dari fotovoltaik terhadap efektivitas filter aktif terkopel fotovoltaik.
4. Implementasi pengatur arus referensi filter aktif.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Mikrokontroler yang digunakan adalah STM32F4.
2. Beban yang digunakan adalah penyearah 6-pulsa dengan tahanan 1000 ohm dan rating arus 1 ampere.

1.4 Tujuan

1. Mendapatkan model filter aktif terkopel fotovoltaik.
2. Mendapatkan sistem pengaturan filter aktif pada kondisi tegangan sumber tidak ideal.
3. Mengetahui pengaruh injeksi daya aktif fotovoltaik pada filter aktif terkopel fotovoltaik.
4. Membuat purwarupa pembangkit arus referensi untuk aplikasi filter aktif dengan menggunakan teori p-q.

1.5 Kontribusi Penelitian

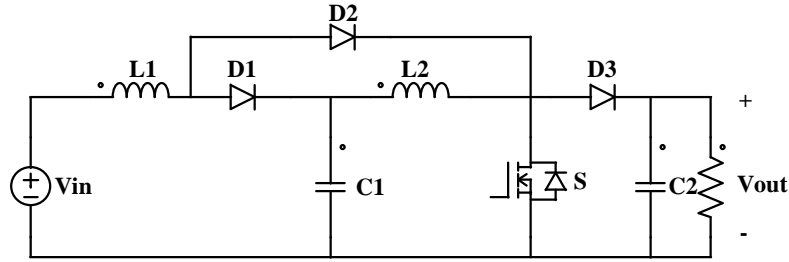
Mengacu pada metode yang digunakan pada pengaturan filter aktif, maka diharapkan penelitian ini memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Memberikan metode pengaturan filter aktif terkopel fotovoltaik.
2. Memberikan metode pengaturan filter aktif pada kondisi tegangan tidak ideal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

FILTER AKTIF PADA SISTEM FOTOVOLTAIK TERHUBUNG JALA-JALA

Tata letak induktor, kapasitor, dioda, dan saklar pada konverter quadratik seperti ditunjukkan Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Topologi konverter quadratik

Hubungan tegangan masukan dan keluaran seperti pada persamaan berikut :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (2.1)$$

dengan D adalah duty cycle.

Untuk menghitung komponen induktor dan kapasitor dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut [7]:

nilai induktor L_2 dihitung berdasar persamaan (2.2):

$$L_{2min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (2.2)$$

nilai induktor L_1 dihitung berdasar persamaan (2.3):

$$L_{1min} = \frac{D(1-D)^4 R}{2f_s} \quad (2.3)$$

nilai kapasitor C_2 dihitung berdasar persamaan (2.4):

$$C_2 = V_{out} \frac{D}{\Delta V_{out} R f_s} \quad (2.4)$$

nilai kapasitor C_1 dihitung berdasar persamaan (2.5):

$$C_1 = V_{out} \frac{D}{(1-D) \Delta V_{C1} R f_s} \quad (2.5)$$

Dengan R = tahanan beban

f_s = frekuensi pensaklaran

ΔV_{out} = riak tegangan keluaran

ΔV_{C1} = riak tegangan kapasitor C_1

Kapasitor pada sisi DC VSI dapat dihitung dengan menganalisis energi yang tersimpan pada kapasitor seperti pada persamaan (2.6) dan (2.7) berikut [8]:

$$\int_{t_1}^{t_2} P \cdot \cos(\omega t) = \frac{1}{2} C ((V_{dc2})^2 - (V_{dc1})^2) \quad (2.6)$$

$$C_{min} = \frac{P}{\omega_1 \cdot V_{dc} \cdot \Delta V_{dc}} \quad (2.7)$$

Dengan P = kapasitas daya filter aktif

C = kapasitor filter aktif

C_{min} = nilai minimal kapasitor filter aktif

V_{dc} = tegangan sisi DC filter aktif

ΔV_{dc} = riak tegangan sisi DC filter aktif

2.2 Sistem Kontrol Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik Menggunakan Teori p-q

Pola penyalan saklar VSI yang terdapat pada filter aktif untuk menginjeksikan arus anti harmonisa ditentukan oleh arus referensi. Arus referensi dibandingkan dengan arus anti harmonisa yang diinjeksikan dengan menggunakan *hysteresis current control*. Kemudian akan diperoleh pola penyaklaran untuk mengatur VSI. Arus referensi pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan teori p-q. Besaran tegangan dan arus tiga fasa hasil pengukuran dalam koordinat *abc* akan ditransformasikan menjadi koordinat $\alpha\beta$ menggunakan transformasi *clarke*. Persamaan (2.8) dan (2.9) masing-masing merupakan matrik transformasi tegangan dan arus dari koordinat *abc* menjadi koordinat $\alpha\beta$.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Daya aktif dan daya reaktif sesaat berdasarkan teori p-q dapat dinyatakan dengan komponen tegangan dan arus pada koordinat $\alpha\beta$ seperti pada persamaan (2.10) [9].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Daya sesaat p dan q pada persamaan (2.10) terdiri dari komponen AC ($p\sim$ dan $q\sim$) dan DC (P dan Q), sehingga:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P + p\sim \\ Q + q\sim \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Besar arus sumber sebagai fungsi dari daya p dan q adalah:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

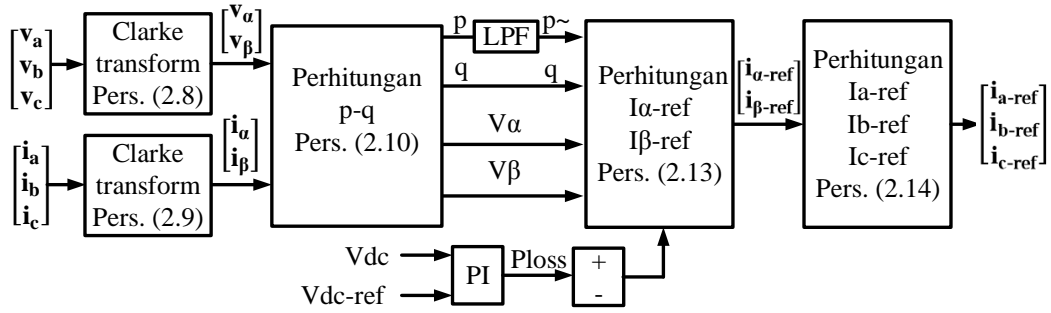
Dari persamaan (2.11) dan persamaan (2.12) dapat diketahui bahwa untuk mengeliminasi daya reaktif dari sisi sumber adalah dengan membuat negatif nilai q pada persamaan (2.12). Untuk memisahkan komponen harmonisa arus sumber, daya p hanya menggunakan komponen AC $p\sim$. Kemudian besar daya dari fotovoltaik ditambahkan. Rugi daya pada VSI direperentasikan sebagai P_{loss} , sehingga arus referensi yang dibangkitkan adalah :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\text{-ref}} \\ i_{\beta\text{-ref}} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p\sim - P_{\text{loss}} + P_{\text{PV}} \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Arus referensi pada persamaan (2.13) kemudian ditransformasikan dari koordinat $\alpha\beta$ menjadi menjadi koordinat abc dengan persamaan (2.14) berikut:

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Langkah teori p-q untuk membangkitkan arus referensi filter aktif seperti ditunjukkan blok diagram pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Blok diagram perhitungan teori p-q

2.3 Performansi Teori p-q pada Pembangkitan Arus Referensi Filter Aktif

Tegangan jala-jala dapat mengalami cacat gelombang karena berbagai kondisi abnormal sehingga dalam kondisi real, tegangan jala-jala tidak selalu dalam kondisi sinusoidal murni. Dalam perhitungan arus referensi berdasarkan teori p-q konvensional, bentuk gelombang tegangan diasumsikan dalam kondisi sinusoidal murni.

Persamaan (2.13) menunjukkan perhitungan untuk membangkitkan arus referensi. Nilai tegangan pada persamaan (2.13) akan bernilai konstan pada kondisi tegangan ideal. Namun dalam kondisi tegangan terdistorsi, nilai tegangan tidak akan bernilai konstan sehingga arus referensi yang dibangkitkan bukan gelombang arus yang sebenarnya dibutuhkan untuk mengkompensasi gelombang harmonisa. oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa performa teori p-q akan turun jika diaplikasikan pada kondisi tegangan tidak ideal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

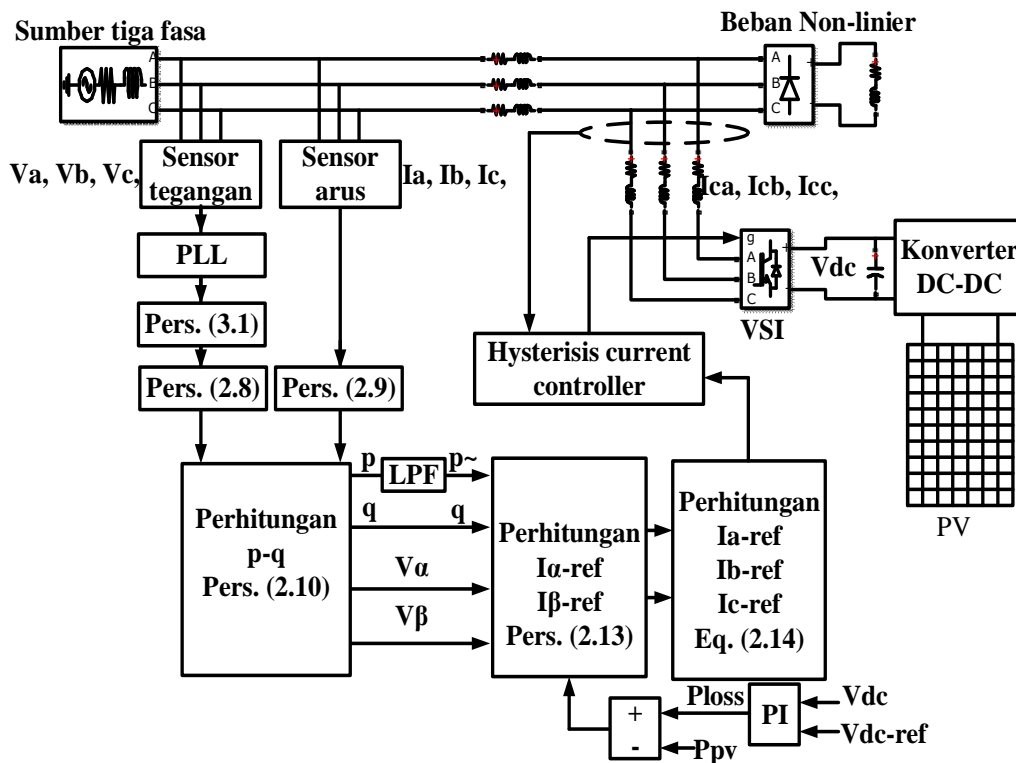
BAB III

SIMULASI FILTER AKTIF TERKOPEL FOTOVOLTAIK PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK IDEAL

3.1 Strategi Pembangkitan Arus Referensi pada Filter Aktif Terkoppel Fotovoltaik pada Kondisi Tegangan tidak Ideal

Untuk mengatasi kelemahan teori p-q pada kondisi tegangan tidak ideal, maka pada penelitian tegangan sumber yang tidak ideal dinormalisasi dengan menggunakan *Phase Lock Loop* (PLL) untuk mendeteksi fasa, kemudian dari fasa tersebut akan dibangkitkan sinyal gelombang tiga fasa berdasarkan persamaan (3.1). Gambar 3.1 menunjukkan konfigurasi sistem APF+PV dengan perhitungan teori p-q pada kondisi tegangan tidak ideal. Notasi APF+PV menunjukkan sistem filter aktif terkoppel fotovoltaik.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Gambar 3.1 Konfigurasi APF+PV dengan perhitungan teori p-q pada kondisi tegangan tidak ideal

3.2 Simulasi Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik pada Kondisi Tegangan Tidak Ideal

Pada bagian sub-bab ini akan didefinisikan kondisi tegangan tidak ideal sebelum dilakukan simulasi sistem secara keseluruhan. Tegangan ideal adalah tegangan sinusoidal murni sedangkan tegangan tidak ideal adalah tegangan sinus yang terdistorsi dan atau tidak seimbang [10]. Tegangan ideal seperti ditunjukkan pada persamaan (3.1).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_{rms}\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Tegangan tidak seimbang adalah tegangan tiga fasa yang memiliki besar amplitudo dan pergeseran fasa tidak sama. Tegangan tidak seimbang dapat dinyatakan dalam tegangan urutan positif dan negatif seperti pada persamaan (3.2).

$$\begin{bmatrix} V_{au} \\ V_{bu} \\ V_{cu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{au+} \\ V_{bu+} \\ V_{cu+} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{au-} \\ V_{bu-} \\ V_{cu-} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Persamaan (3.2) menjelaskan tegangan tidak seimbang merupakan penjumlahan dari komponen urutan positif V_{au+} , V_{bu+} , V_{cu+} , dan komponen negatif V_{au-} , V_{bu-} , V_{cu-} .

Tegangan terdistorsi sering dijumpai pada sistem kelistrikan distribusi. Tegangan terdistorsi pada dasarnya terjadi karena terdapat komponen harmonisa yang menumpang pada komponen fundamental tegangan. Tegangan terdistorsi dapat dinyatakan persamaan (3.3) sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} V_{ad} \\ V_{bd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ah} \\ V_{bh} \\ V_{ch} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Tegangan V_{af} , V_{bf} , V_{cf} , merupakan komponen fundamendal pada masing-masing fasa sedangkan tegangan V_{ah} , V_{bh} , V_{ch} , merupakan komponen harmonisa yang dapat terdiri pada beberapa orde.

Konfigurasi sistem APF+PV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 disimulasikan dengan MATLAB/Simulink untuk mengetahui performa dari sistem. *Time sampling* yang digunakan adalah 0.000006 s.

Skenario yang dilakukan pada saat simulasi meliputi, aliran daya dari sumber, PV dan beban. *Time line* simulasi dilakukan selama 0.2s dengan 0.1s pertama sistem beroperasi sebagai APF murni kemudian pada detik selanjutnya daya dari PV diinjeksikan. Simulasi terhadap kondisi tegangan dilakukan pada kondisi tegangan ideal, tidak seimbang, dan terdistorsi.

Tabel 3.1 menunjukkan parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi filter aktif terkopel fotovoltaik. Komponen yang digunakan dihitung berdasarkan persamaan (2.2) – (2.7).

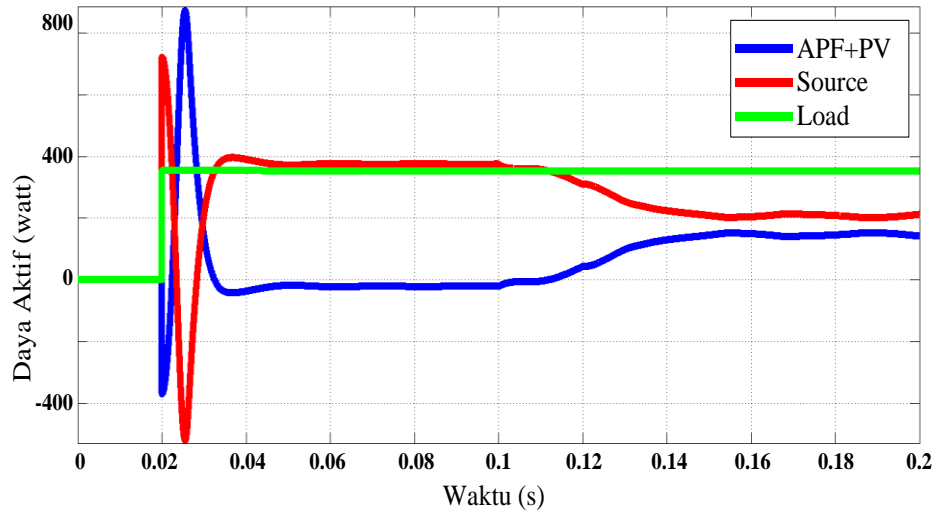
Tabel 3.1 Parameter simulasi filter aktif terkopel fotovoltaik

Parameter	Value
V_{Sumber}	3Ø 380 volt
frekuensi	50 Hz
Beban	Penyearah 6-pulsa 350 watt, 10 var
V_{DC}	850 volt
Kapasitor DC-link	20 μF
Induktor filter L_F	55 mH
P_{PV}	250 watt
Konstanta PI	$K_p = 10$, $K_i = 15$
Komponen konverter	$L_1 = 25 \mu\text{H}$, $L_2 = 150 \mu\text{H}$, $C_1 = 68,544 \mu\text{F}$, $C_2 = 52,735 \mu\text{F}$

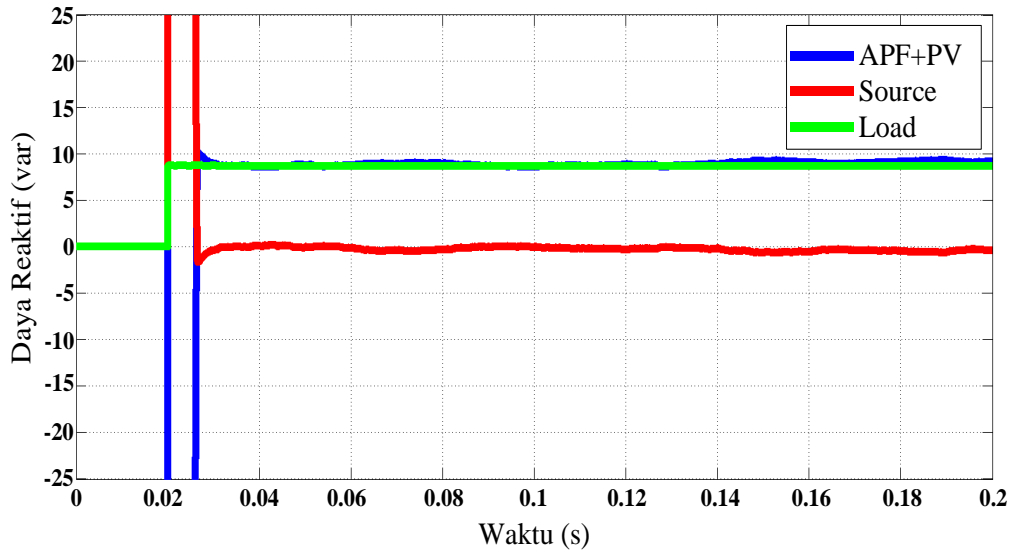
3.2.1 Daya Aktif dan Daya Reaktif pada Sistem Filtre Aktif Terkopel Fotovoltaik

Filter aktif terkopel fotovoltaik secara aktif dikontrol untuk dapat menyuplai daya aktif dan reaktif ke beban dan atau ke jala-jala. Simulasi dilakukan dengan kondisi beban konstan 350 Watt dan 10 Var. Sistem berfungsi sebagai filter aktif murni pada saat $t=0.02\text{s}$ sampai $t=0.1\text{s}$, pada rentang waktu ini, semua kebutuhan daya aktif beban dilayani oleh sumber. kemudian pada rentang waktu $t=0.1\text{s}$ sampai $t=0.2\text{s}$ daya dari PV diinjeksikan sehingga kebutuhan daya aktif beban disuplai oleh sumber dan PV. Sedangkan untuk daya reaktif, semua kebutuhan

beban dilayani oleh filter aktif. Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 masing-masing menunjukkan hubungan daya aktif dan reaktif antara sumber, beban, dan APF+PV. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem APF+PV sudah dapat mengontrol aliran daya aktif dan reaktif yang diinjeksikan.



Gambar 3.2 Kurva hubungan daya aktif antara sumber, beban dan APF+PV

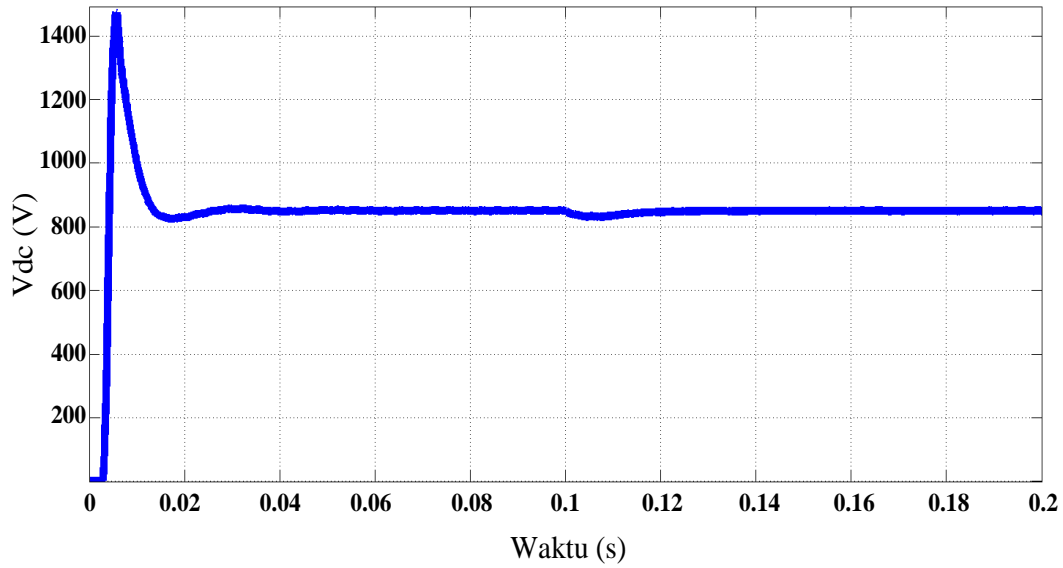


Gambar 3.3 Kurva hubungan daya reaktif antara sumber, beban dan APF+PV

3.2.2 Tegangan Sisi DC pada Sistem Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik

Sesuai dengan perancangan, tegangan sisi DC dijaga konstan pada tegangan referensi 850 volt. Gambar 3.4 menunjukkan tegangan sisi DC sudah dapat dijaga

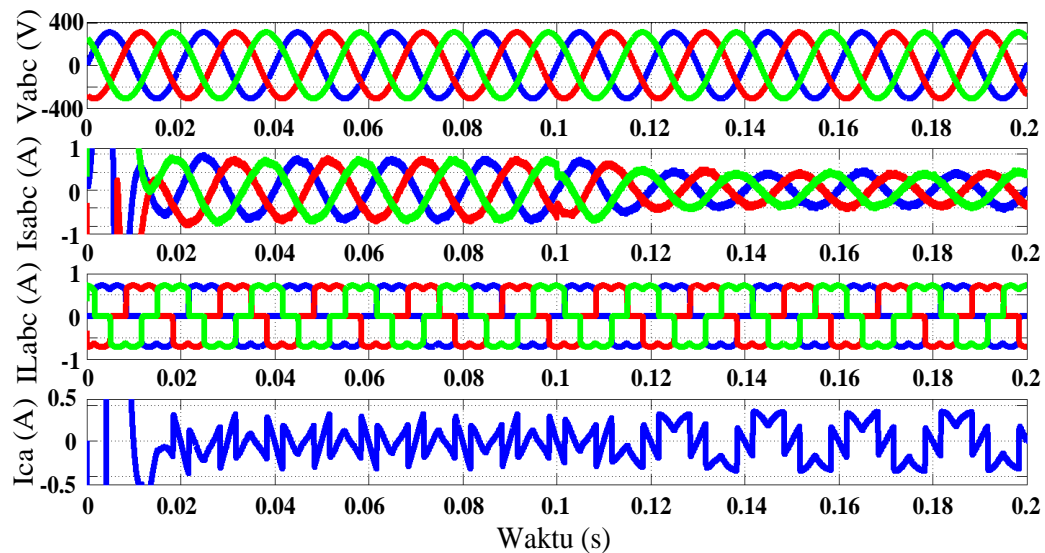
konstan sesuai tegangan referensi meskipun terjadi proses injeksi daya dari PV pada saat $t = 0.1$ s. hal ini menunjukkan bahwa regulator tegangan sisi DC sudah berkerja optimal.



Gambar 3.4 Tegangan sisi DC APF+PV

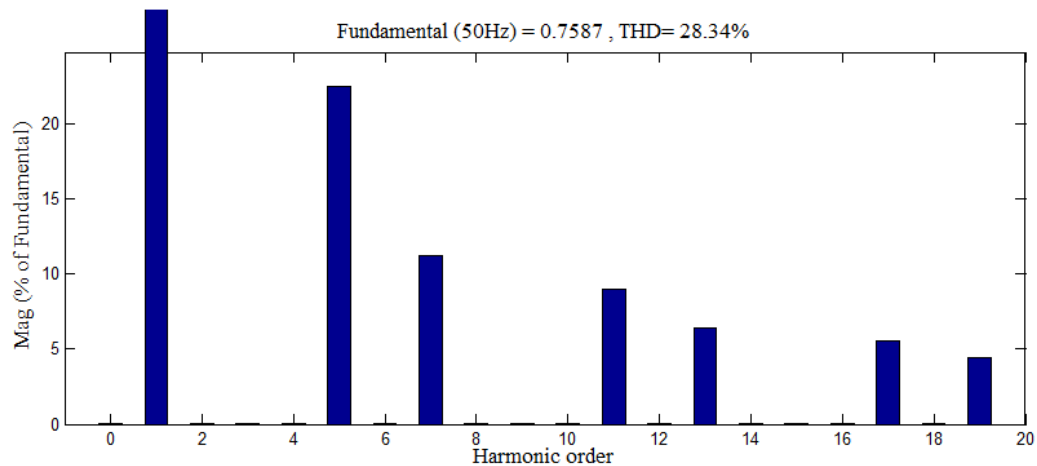
3.2.3 Simulasi pada Kondisi Tegangan Ideal

Bentuk tegangan sumber pada kondisi ideal ini adalah sinusoidal murni. Besar tegangan sumber yang digunakan seperti pada persamaan (3.1) dengan $V_{rms} = 220$ volt. Gambar 3.5 menunjukkan hasil simulasi pada kondisi ideal.

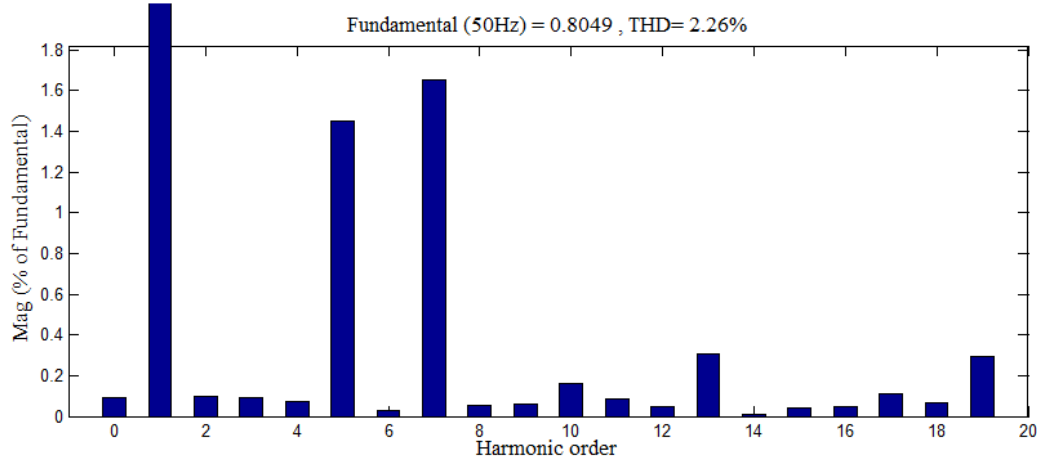


Gambar 3.5 Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber ideal

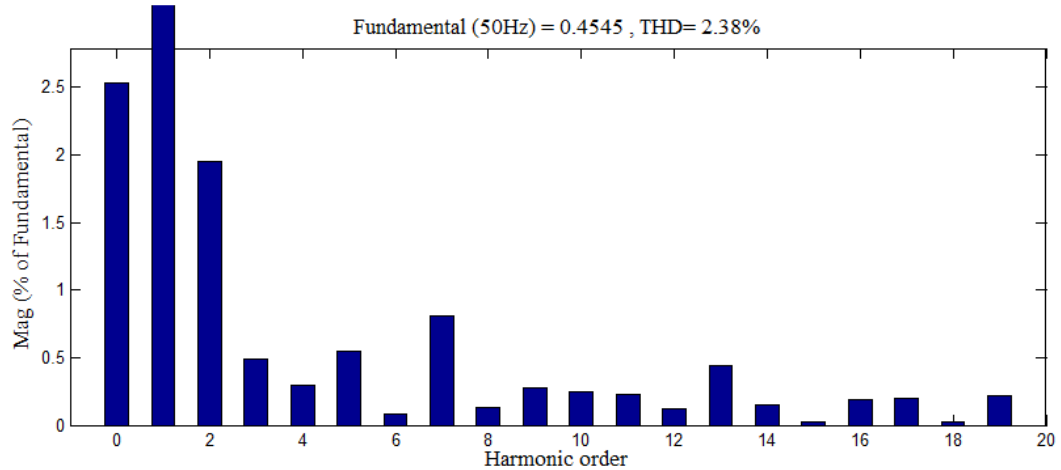
Pada penelitian ini, analisis kandungan komponen harmonisa dilakukan dengan menggunakan *Fast Fourier Trasform (FFT) Analysis* dengan frekuensi maksimal yang digunakan dalam perhitungan *Total Hamonic Distorsion* (THD) adalah 1000 Hz. Magnitudo komponen fundamental dan komponen harmonisa dinyatakan dalam satuan persen. Magnitudo pada orde satu atau pada frekuensi fundamental akan bernilai 100% yang merupakan magnitudo terbesar, sedangkan pada orde lain akan bernilai lebih kecil daripada orde satu. Gambar 3.6 – 3.8 menunjukkan spektrum harmonisa pada kondisi tegangan ideal.



Gambar 3.6 THD arus sumber sebelum dikompensasi



Gambar 3.7 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF



Gambar 3.8 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV

Dari hasil simulasi nilai THD arus sumber sebelum dikompensasi adalah 28.34% seperti yang ditunjukkan Gambar 3.6. Sedangkan setelah dikompensasi, nilai THD arus sumber adalah 2.26 % ketika sistem beroperasi sebagai APF murni seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Ketika APF dikopel dengan PV, nilai THD arus sumber adalah 2.38% seperti yang ditunjukkan Gambar 3.8.

Hasil simulasi pada kondisi ideal ini akan dijadikan sebagai data pembandingan dengan hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber tidak ideal.

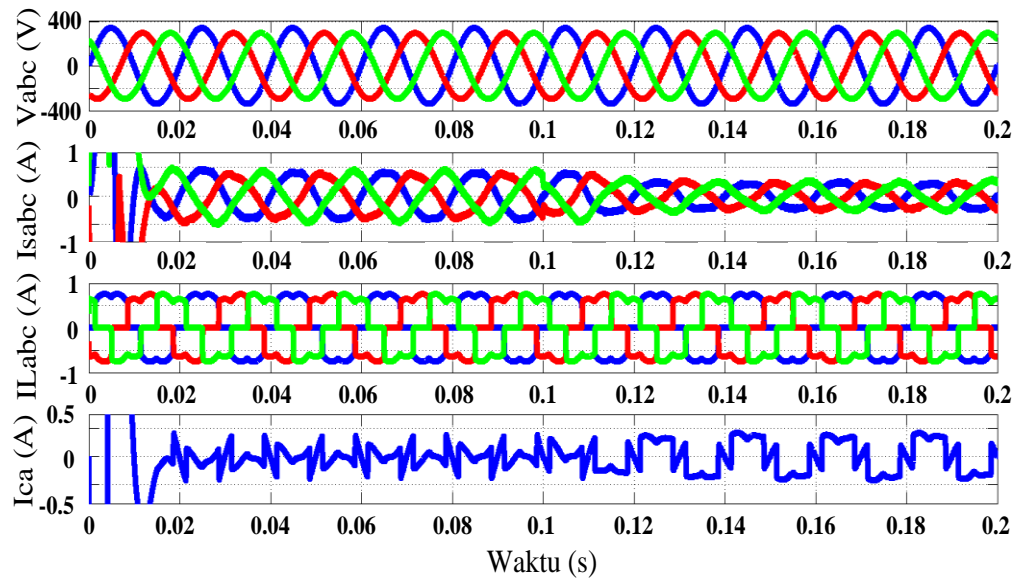
3.2.4 Simulasi pada Kondisi Tegangan Sumber tidak Seimbang

Bentuk tegangan sumber tidak seimbang seperti pada persamaan (13) adalah sebagai berikut:

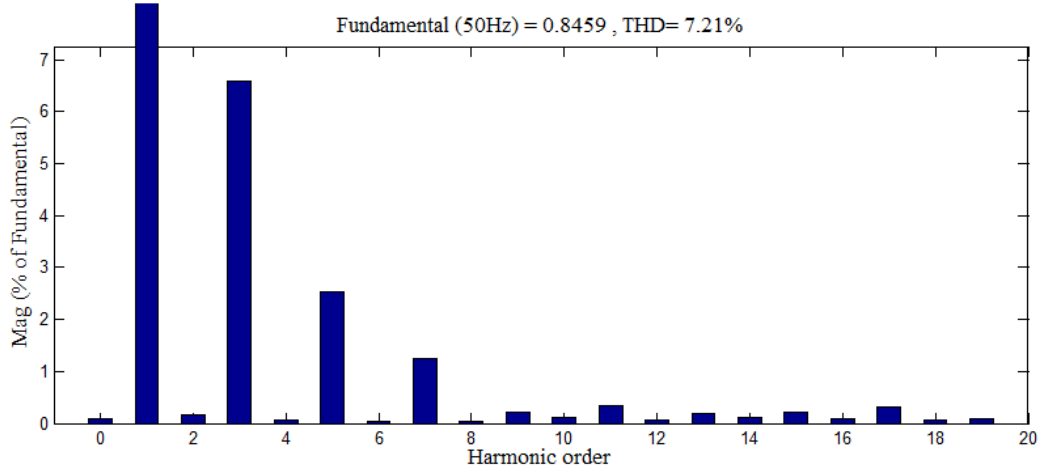
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + 31.11 \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix}$$

Gambar 3.9 menunjukkan hasil simulasi pada kondisi tegangan tidak seimbang. Komponen gelombang urutan negatif sebesar 10% pada tegangan sumber menyebabkan tegangan sumber tidak seimbang. Perhitungan bentuk arus referensi dengan teori p-q pada kondisi tegangan tidak ideal ini akan menyebabkan THD yang dihasilkan relatif lebih besar dibandingkan pada kondisi tegangan sumber ideal. Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 masing-masing

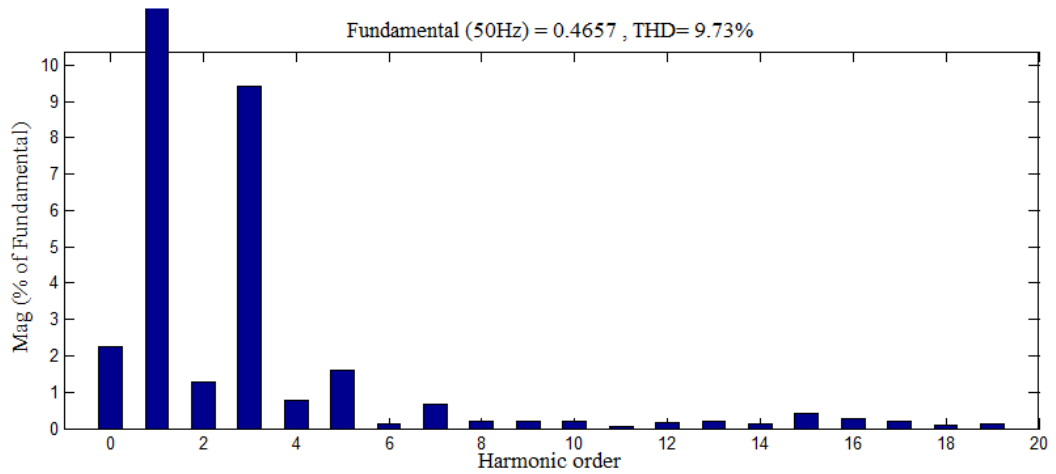
menunjukkan THD kondisi tegangan tidak seimbang pada saat sistem beroperasi sebagai APF murni dan pada saat sistem beroperasi sebagai APF+PV.



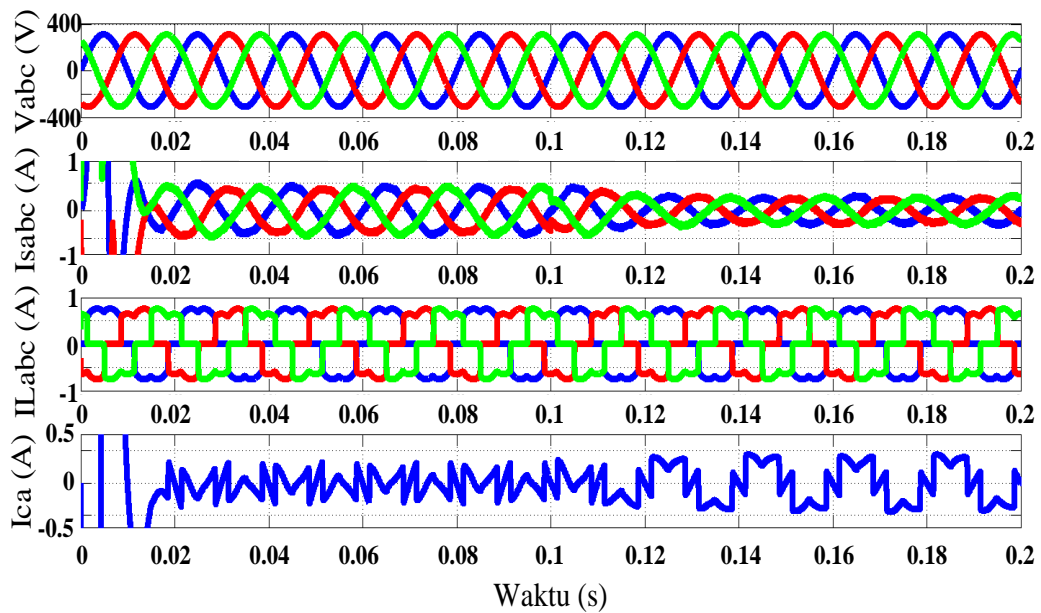
Gambar 3.9. Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber seimbang



Gambar 3.10 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF pada kondisi tegangan tidak seimbang



Gambar 3.11 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV pada kondisi tegangan tidak seimbang

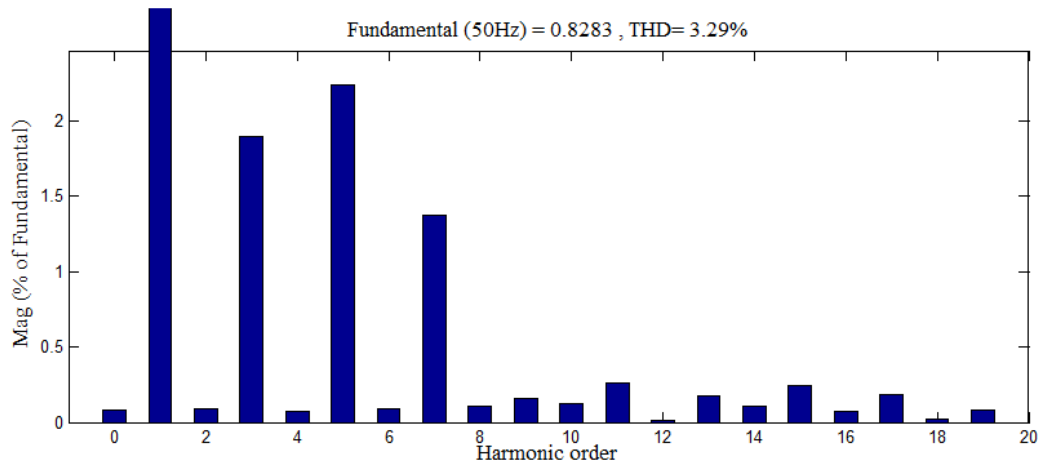


Gambar 3.12 Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber tidak seimbang dengan normalisasi tegangan sumber

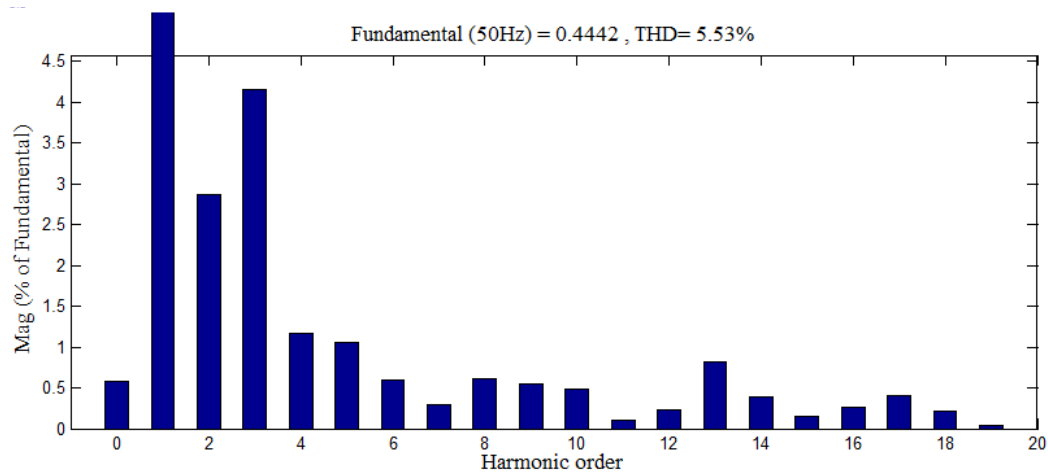
Dari Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 diketahui bahwa kandungan harmonisa pada mode APF adalah 7.21% dan 9.73% pada saat mode APF+PV. Hasil ini lebih besar jika dibandingkan pada kondisi tegangan sumber ideal.

Simulasi juga dilakukan pada kondisi tegangan tidak seimbang dengan normalisasi sinyal tegangan sumber sebelum dilakukan perhitungan arus referensi.

Gambar 3.12 menunjukkan hasil simulasi dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan tidak seimbang. Gambar 3.13 dan dan gambar 3.14 menunjukkan THD arus sumber pada saat sistem beroperasi APF murni dan pada saat beroperasi APF+PV.



Gambar 3.13 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan tidak seimbang



Gambar 3.14 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV dengan normalisasi tegangan pada kondisi tegangan tidak seimbang

Normalisasi tegangan pada kondisi tegangan tidak seimbang ini menyebabkan THD yang dihasilkan relatif lebih baik jika dibandingkan dengan tanpa normalisasi tegangan. Pada simulasi kondisi tegangan tidak seimbang ini,

THD arus sumber turun dari 7.21% menjadi 3.29% pada mode APF, dan turun dari 9.73% menjadi 5.53% pada mode APF+PV.

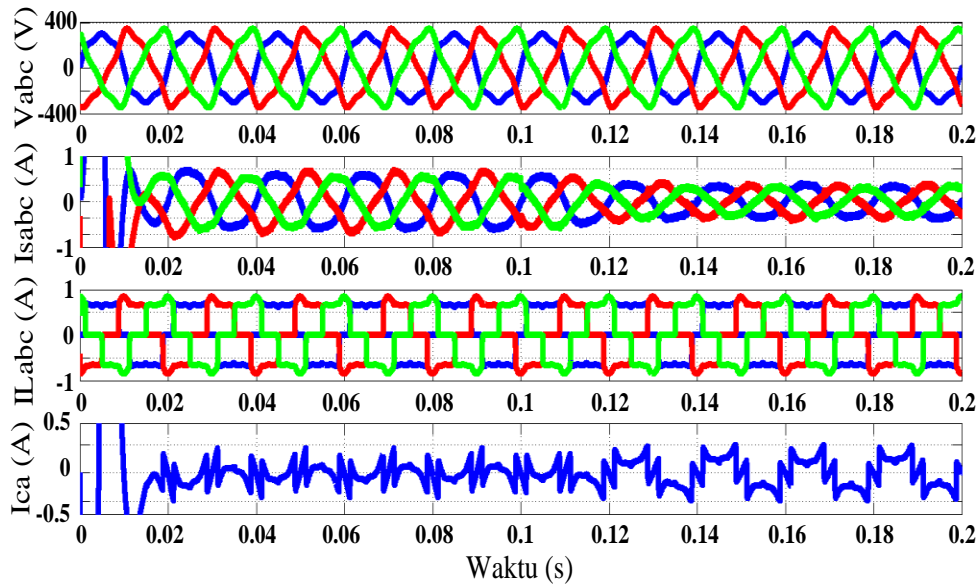
3.2.5 Simulasi pada Kondisi Tegangan Terdistorsi

Pada simulasi ini digunakan harmonisa ke-3 dan ke-5 seperti pada persamaan berikut

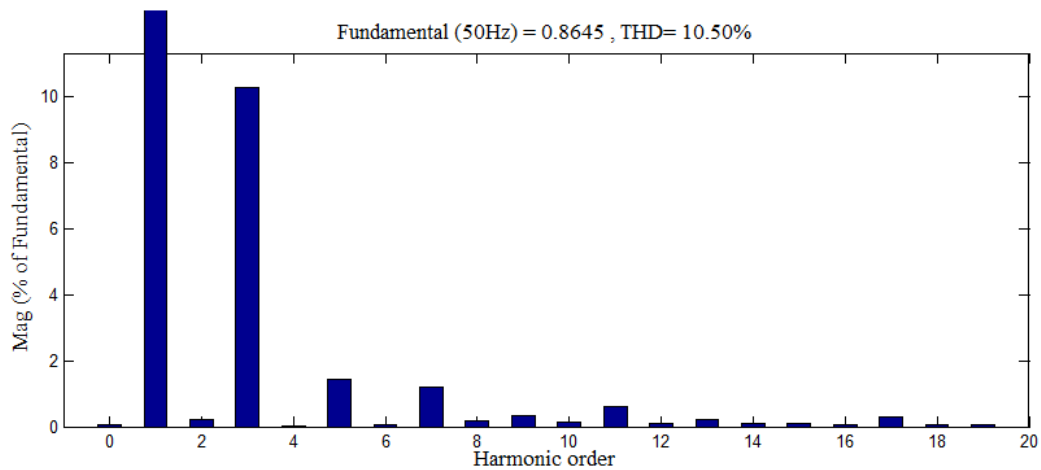
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + 31.11 \begin{bmatrix} \sin(3\omega t) \\ \sin(3\omega t - 120^\circ) \\ \sin(3\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + 24.89 \begin{bmatrix} \sin(5\omega t) \\ \sin(5\omega t - 120^\circ) \\ \sin(5\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

Hasil simulasi pada kondisi tegangan terdistorsi ditunjukkan pada Gambar 3.15. THD pada kondisi tegangan terdistorsi ditunjukkan pada Gambar 3.16 dan Gambar 3.17.

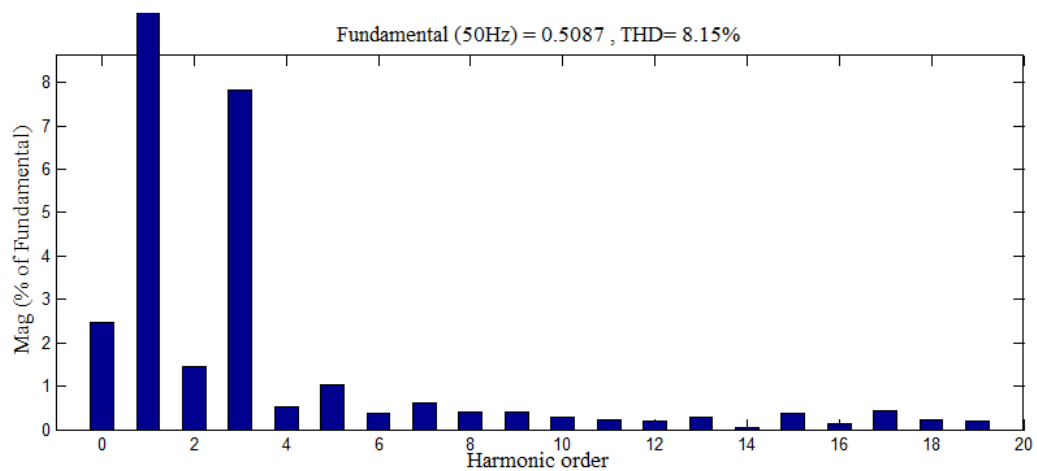
THD pada kondisi tegangan sumber terdistorsi relatif lebih besar jika dibandingkan pada kondisi tegangan ideal. Pada saat sistem beroperasi sebagai APF murni, THD arus sumber adalah 10.50% seperti ditunjukkan Gambar 3.16. Sedangkan saat beroperasi sebagai APF+PV memiliki THD 8.15% seperti yang ditunjukkan Gambar 3.17



Gambar 3.15 Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber terdistorsi

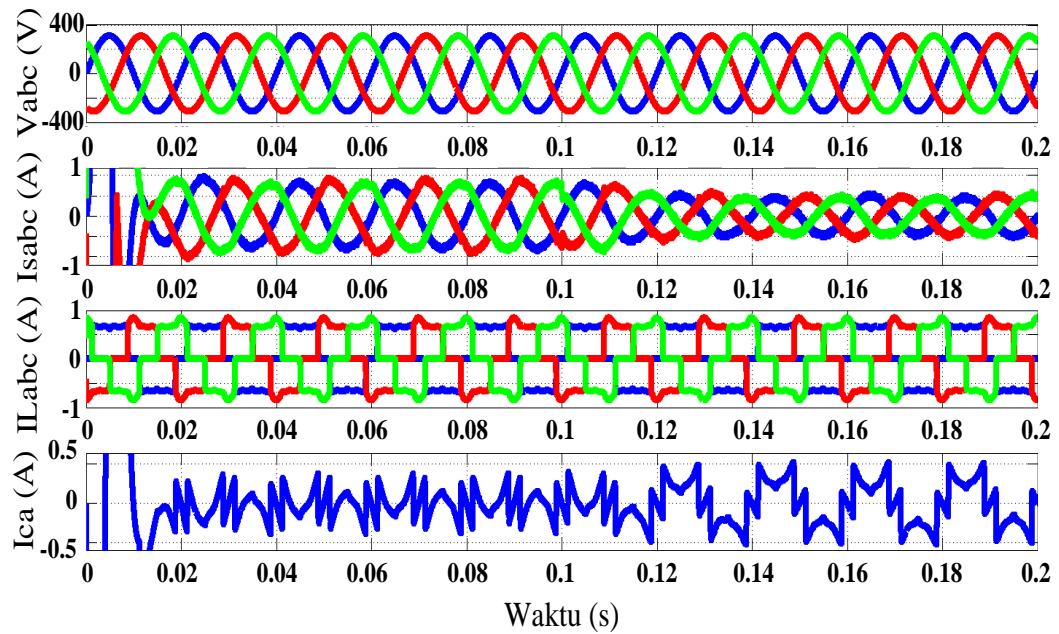


Gambar 3.16 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF pada kondisi tegangan terdistorsi



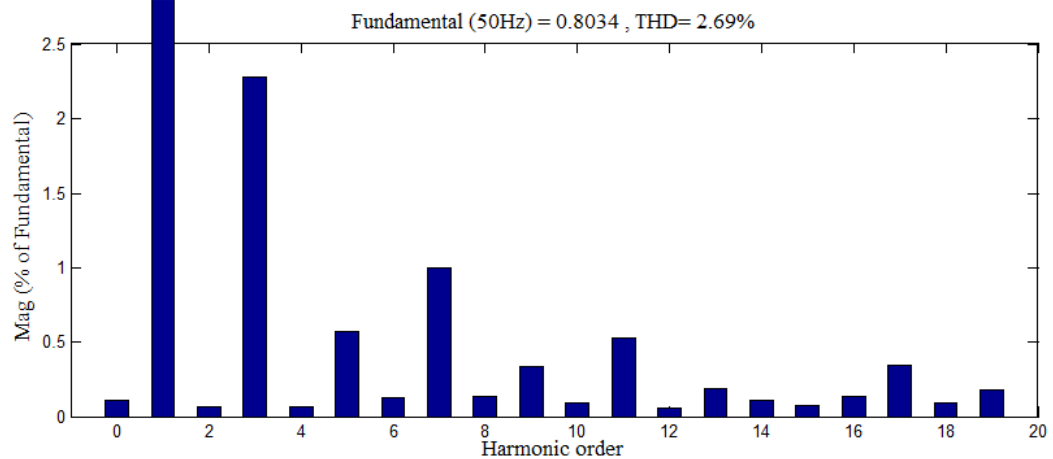
Gambar 3.17 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF+PV pada kondisi tegangan terdistorsi

Simulasi juga dilakukan dengan melakukan normalisasi sinyal tegangan terlebih dahulu sebelum melakukan proses perhitungan arus referensi. Gambar 3.18 menunjukkan hasil simulasi pada kondisi tegangan terdistorsi dengan normalisasi tegangan.

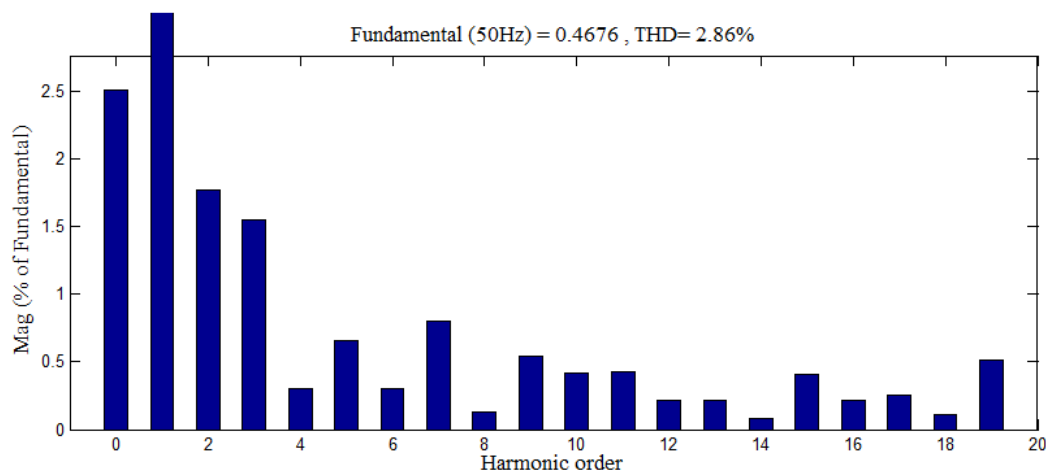


Gambar 3.18. Hasil simulasi pada kondisi tegangan sumber terdistorsi dengan normalisasi tegangan sumber

THD arus sumber yang dihasilkan pada kondisi tegangan terdistorsi dengan normalisasi tegangan seperti ditunjukkan Gambar 3.19 dan Gambar 3.20.



Gambar 3.19 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan terdistorsi



Gambar 3.20 THD arus sumber setelah dikompensasi pada mode APF dengan normalisasi tegangan sumber pada kondisi tegangan terdistorsi

Hasil simulasi pada kondisi tegangan terdistorsi ini menunjukkan bahwa akurasi teori p-q menurun sehingga THD yang dihasilkan relatif lebih besar jika dibandingkan pada kondisi tegangan ideal. Hasil simulasi pada tegangan terdistorsi ini menunjukkan bahwa normalisasi tegangan dapat meningkatkan akurasi teori p-q. Dengan normalisasi tegangan pada simulasi tegangan terdistorsi ini, THD arus sumber turun dari 10.50% menjadi 2.69% pada mode APF murni. Dan pada mode APF+PV, THD turun dari 8.15% menjadi 2.86%.

3.3 Efektivitas Filter Aktif Terkopel Fotovoltaik Terhadap Injeksi Daya Aktif Fotovoltaik

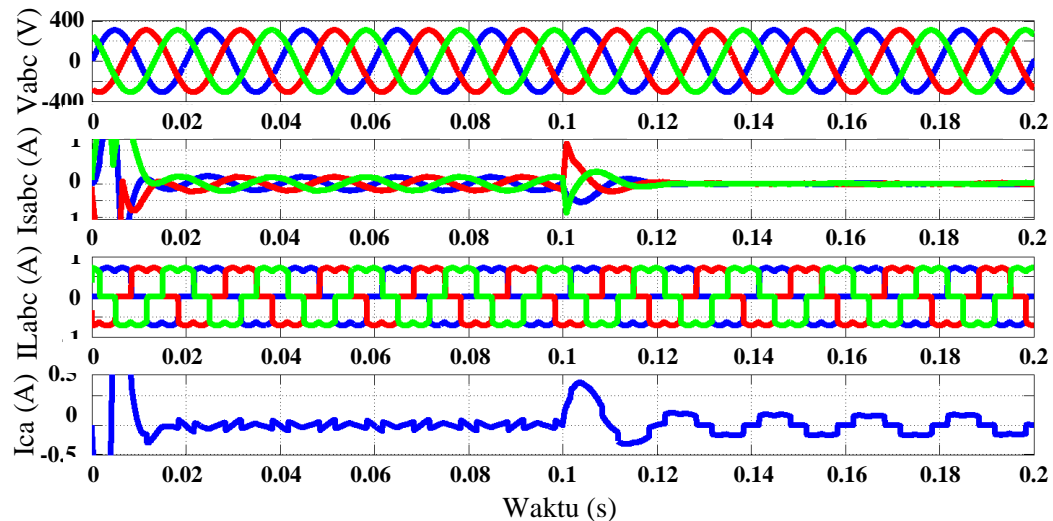
Pada bagian ini akan dianalisis pengaruh injeksi daya aktif dari fotovoltaik yang disusun paralel dengan filter aktif terhadap kinerja dari sistem filter aktif terkopel fotovoltaik dalam mengkompensasi arus harmonisa. Injeksi daya aktif dari fotovoltaik akan mengubah bentuk gelombang arus referensi atau arus kompensasi yang dibangkitkan oleh teori p-q untuk mengkompensasi arus harmonisa.

Daya aktif yang dibangkitkan fotovoltaik pada sistem filter aktif terkopel fotovoltaik digunakan untuk mengkompensasi daya aktif yang dikonsumsi beban. Besar daya aktif dari sumber jala-jala akan digantikan oleh daya aktif yang dibangkitkan oleh fotovoltaik. Daya aktif yang dibangkitkan oleh fotovoltaik akan

diinjeksikan pada jala-jala jika daya aktif yang dibangkitkan fotovoltaik melebihi daya aktif yang dibutuhkan oleh beban. Dalam kondisi seperti ini daya aktif pada jala-jala akan bernilai negatif.

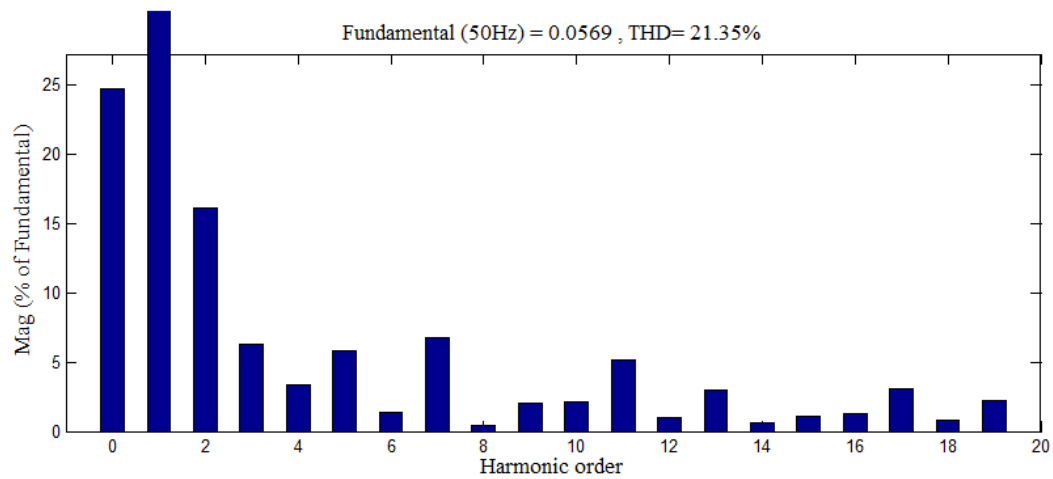
Untuk menguji efektivitas filter aktif ketika dikopel dengan fotovoltaik, maka akan dilakukan simulasi pada beberapa kondisi. Yaitu pada saat kebutuhan daya aktif beban dilayani oleh jala-jala dan fotovoltaik seperti yang telah dilakukan pada simulasi point sub-bab 3.2.c. Simulasi juga dilakukan pada saat kebutuhan daya aktif beban dilayani sepenuhnya oleh fotovoltaik sehingga arus sumber mendekati nol. Dan yang terakhir, simulasi dilakukan pada kondisi kelebihan daya aktif yang dibangkitkan fotovoltaik diinjeksikan pada jala-jala.

Gambar 3.21 menunjukkan hasil simulasi pada saat gelombang arus sumber mendekati nol. Sedangkan Gambar 3.22 menunjukkan THD pada arus sumber mendekati nol.



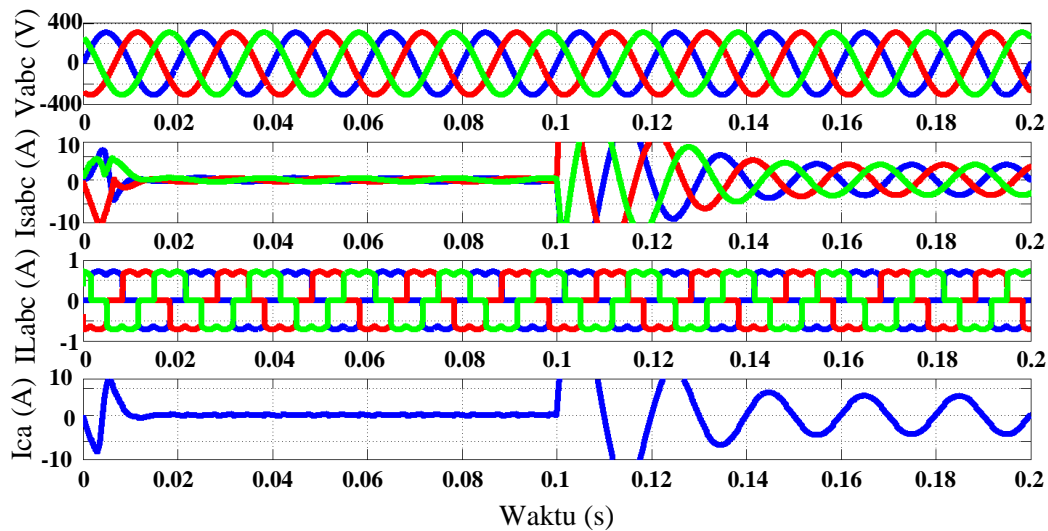
Gambar 3.21 Hasil simulasi pada saat arus sumber mendekati nol

Gambar 3.21 menunjukkan bahwa arus sumber mendekati nol ketika kebutuhan daya aktif beban dilayani oleh fotovoltaik sepenuhnya. Besar arus sumber pada simulasi ini adalah 0.04 ampere. Nilai THD arus pada hasil simulasi adalah 21.35% seperti pada Gambar 3.22.

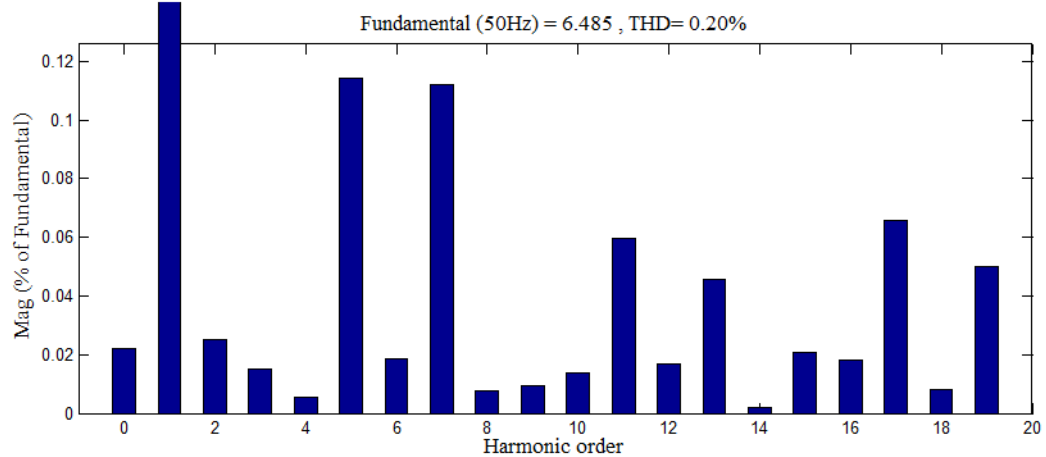


Gambar 3.22 THD arus sumber pada saat arus sumber mendekati nol

Simulasi selanjutnya adalah pada saat daya aktif yang dibangkitkan oleh fotovoltaiik juga diinjeksikan pada jala-jala. Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya aktif pada jala-jala bernilai negatif dengan arus sebesar 4.6 ampere. Gambar 3.23 menunjukkan hasil simulasi pada saat daya aktif fotovoltaiik diinjeksikan pada jala-jala



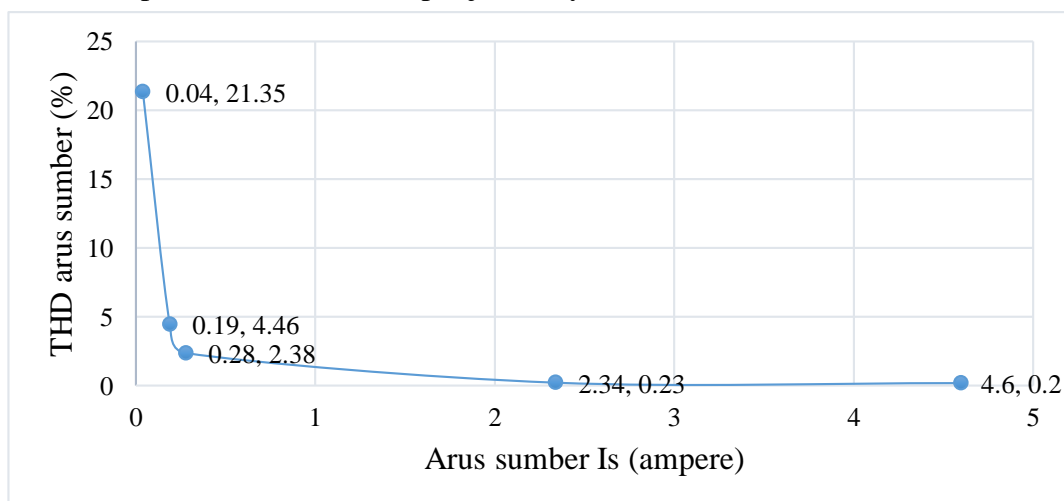
Gambar 3.23 Hasil simulasi pada saat injeksi daya fotovoltaiik pada jala-jala



Gambar 3.24 THD arus sumber pada saat injeksi daya fotovoltaik pada jala-jala

Pada Gambar 3.23 dapat dilihat bahwa fasa arus sumber berbeda 180° terhadap tegangan. Hal ini menunjukkan daya aktif pada jala-jala bernilai negatif. Pada kondisi seperti ini, kelebihan daya dari fotovoltaik diinjeksikan pada jala-jala. Gambar 3.24 menunjukkan THD pada saat injeksi daya fotovoltaik pada jala-jala dengan besar arus sumber 4.6 ampere.

Dari beberapa simulasi tentang efektivitas filter aktif terkopel fotovoltaik terhadap injeksi daya aktif fotovoltaik dapat disimpulkan bahwa THD arus sumber akan semakin besar jika injeksi daya aktif dari fotovoltaik menyebabkan arus sumber mendekati nol. Gambar 3.25 menunjukkan grafik efektivitas filter aktif terkopel fotovoltaik terhadap injeksi daya aktif fotovoltaik.



Gambar 3.25 Grafik efektivitas filter aktif terkopel fotovoltaik terhadap injeksi daya aktif fotovoltaik

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PEMBANGKITAN ARUS REFERENSI FILTER AKTIF HARMONISA

4.1 Spesifikasi Perangkat Keras Pembangkit Arus Referensi Filter Aktif

Pengujian yang akan dilakukan untuk mengetahui performa pembangkit arus referensi filter aktif adalah dalam skala laboratorium. Spesifikasi purwa rupa yang diimplementasikan disesuaikan dengan ketersediaan komponen di pasaran dan instrumentasi pendukung di laboratorium. Tabel 4.1 menunjukkan spesifikasi Pembangkit arus referensi filter aktif

Tabel 4.1 Spesifikasi pembangkit arus referensi filter aktif

Parameter	Value
V _{Sumber}	3Ø 380 volt
Frekuensi	50 Hz
Beban	Penyearah 6-pulsa, 350 watt
Mikrokontroler	STM32F4

4.2 Implementasi Pembangkit Arus Referensi Filter Aktif

Konfigurasi pembangkit arus referensi filter aktif terdiri dari dua blok utama yaitu blok sensor yang berfungsi sebagai masukan dan blok mikrokontroler yang merupakan blok perhitungan arus referensi dengan teori p-q seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Blok diagram pembangkit arus referensi filter aktif

4.2.a Desain Sensor

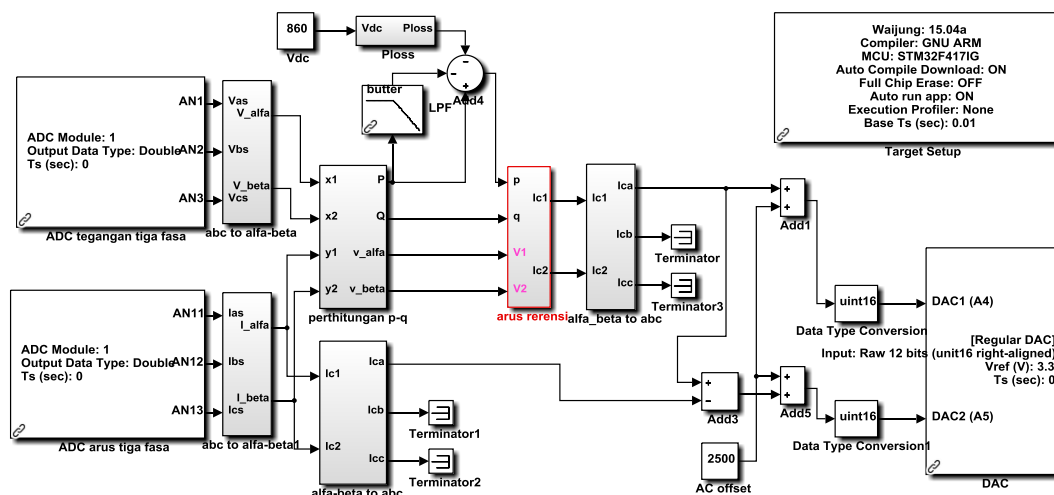
Sensor tegangan dan sensor arus digunakan untuk mendapatkan bentuk tegangan dan arus dari sumber. sensor tegangan menggunakan trafo *step-down* 220/3 volt sedangkan sensor arus menggunakan transformator arus (CT) 50/5 A.

Mikrokontroler STM32F4 hanya dapat membaca besaran sinyal DC dengan batas amplitude 0-3 volt. Oleh sebab itu sinyal AC yang diperoleh dari sensor perlu dijadikan AC *offset* terlebih dahulu sebelum diolah oleh mikrokontroler. Rangkaian *non-inverting adder* digunakan untuk menjadikan sinyal AC *offset* sehingga nilai negatif dapat dibaca oleh mikrokontroler. Detail skematik sensor yang digunakan terdapat pada lampiran.

4.2.b Mikrokontroler

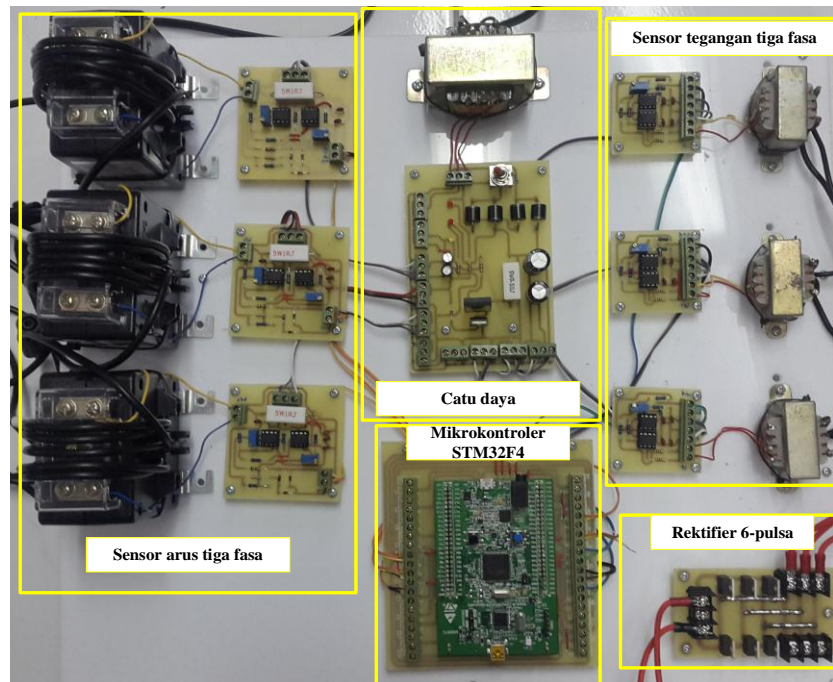
STM32F4 adalah modul dari ST Electronic berdasarkan mikrokontroler arsitektur ARM 32bit dengan prosesor STM32F407VGT6. Mikrokontroler STM32F4 terdiri dari 100 pin yang dapat diprogram termasuk dari pin ground, 3 volt, 4 volt. Untuk Chip STM32F407VGT6 mempunyai banyak fitur yang dapat digunakan, seperti I/O, Timer, ADC, dan DMA. Kecepatan clock nya bisa mencapai 168 MHz sehingga memungkinkan untuk mengerjakan perintah program yang cukup yang panjang dengan cukup singkat. Catu daya dari mikrokontroler ini menggunakan tegangan USB 5 volt [11].

Pemrograman pada mikrokontroler dapat menggunakan MATLAB/Simulink dengan program wajung blok set [12]. Gambar 4.2 menunjukkan langkah perhitungan teori p-q yang diprogram dengan MATLAB/Simulink. *Time sampling* yang digunakan pada pemrograman adalah $T_s = 1/(50 \times 10000)$. Penjelasan mengenai pemrograman dengan MATLAB lebih lanjut terdapat pada lampiran.

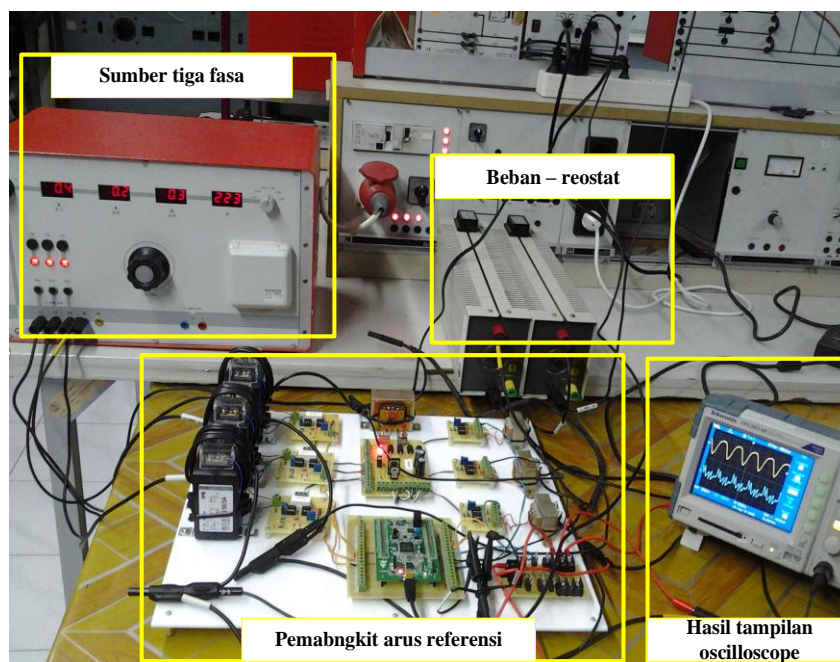


Gambar 4.2 Permmrograman STM32F4 menggunakan MATLAB

Gambar 4.3 menunjukkan implementasi perangkat keras dari pembangkit arus referensi filter aktif harmonisa. Sedangkan Gambar 4.4 menunjukkan proses pengujian dan pengambilan data.



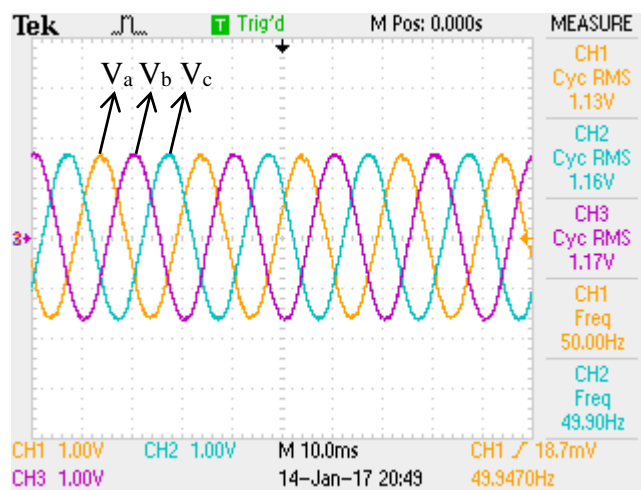
Gambar 4.3 Pembangkit arus referensi filter aktif



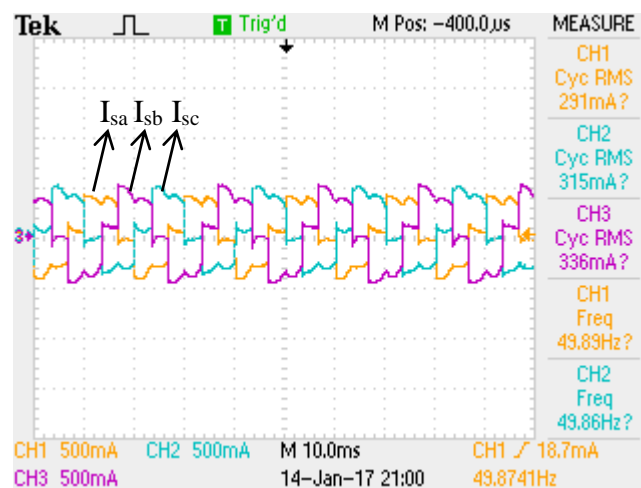
Gambar 4.4 Proses pengujian pembangkit arus referensi filter aktif

4.3 Pengujian Gelombang Keluaran Pembacaan Sensor

Akurasi bentuk gelombang tegangan dan arus dari hasil pembacaan sensor sangat berpengaruh pada bentuk arus referensi yang dihasilkan oleh teori p-q. Oleh sebab itu, harus dipastikan bahwa bentuk gelombang tegangan dan arus dari pembacaan sensor sudah mewakili bentuk sebenarnya. Gambar 4.5 menunjukkan hasil pembacaan gelombang tegangan tiga fasa (*Line-neutral*) sedangkan Gambar 4.6 menunjukkan pembacaan gelombang arus sumber ketika dibebani penyearah 6-pulsa.



Gambar 4.5 Hasil pembacaan sensor gelombang tegangan tiga fasa

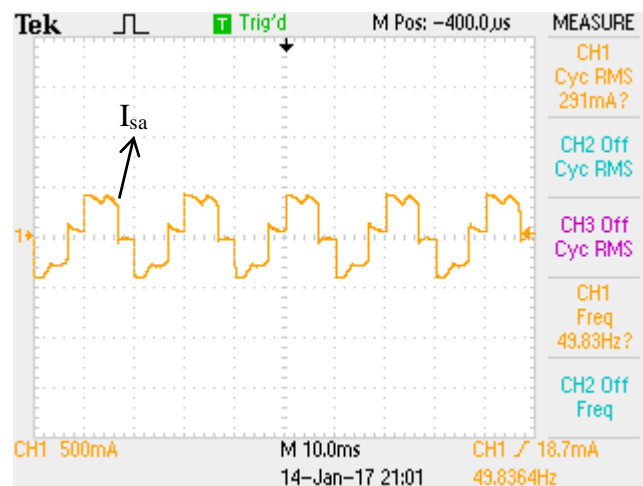


Gambar 4.6 Hasil pembacaan sensor gelombang arus sumber tiga fasa dengan beban penyearah 6-pulsa

Pengambilan data pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 dilakukan dengan $\text{Time/div} = 10 \text{ ms}$. Bentuk tegangan sumber adalah sinusoidal murni dengan frekuensi sudah sama dengan frekuensi sistem 50 Hz. Sedangkan untuk gelombang arus sumber mengalami distorsi akibat beban tidak linier. Bentuk arus sumber yang terdistorsi ini kemudian akan diperbaiki dengan menambahkan arus referensi atau arus kompensasi.

4.4 Pengujian Pembangkitan Arus Referensi Filter Aktif

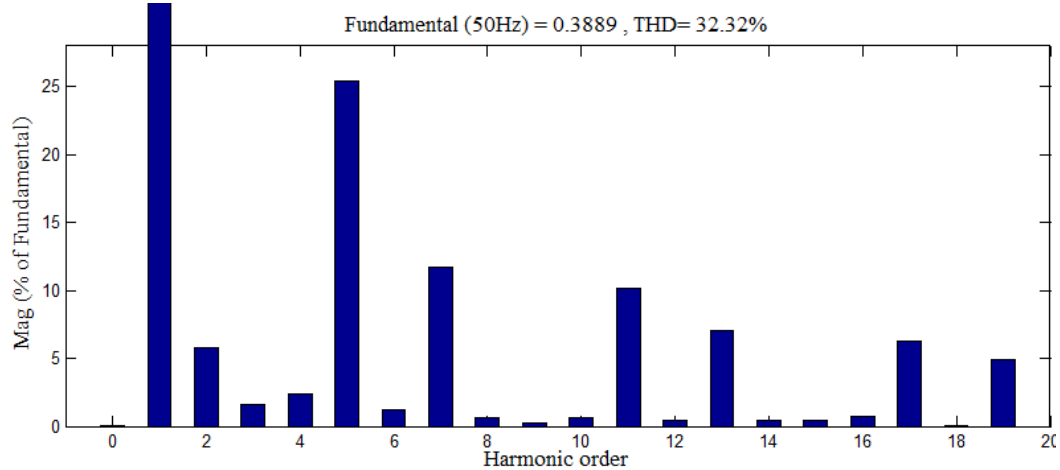
Bentuk gelombang arus sumber pada fasa a ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 ini, gelombang arus masih belum dikompensasi sehingga bentuk gelombangnya tidak sinusoidal.



Gambar 4.7 Bentuk gelombang arus sumber sebelum dikompensasi

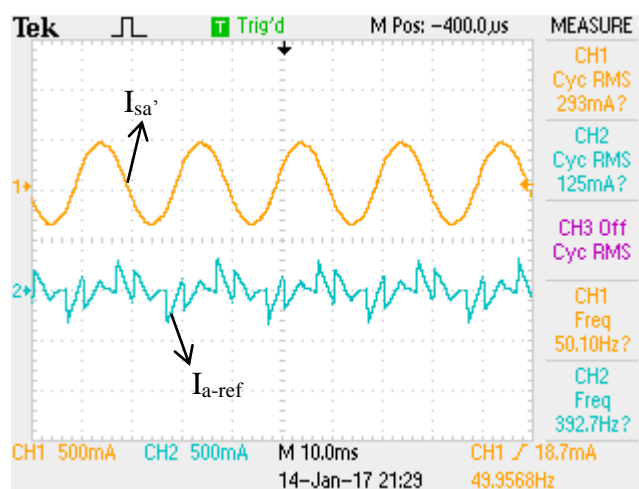
Spektrum harmonisa dan nilai THD pada hasil implementasi dianalisis dengan menggunakan *FFT Analysis* yang terdapat pada MATLAB/Simulink. Metode analisis ini seperti yang telah dilakukan pada proses analisis hasil simulasi. Data sinyal arus dalam domain waktu yang diperoleh dari hasil implementasi kemudian di-*import* pada MATLAB/Simulink untuk dianalisis.

Gambar 4.8 menunjukkan nilai THD arus sumber hasil implementasi sebelum dikompensasi sebesar 32.32%. Nilai THD arus sumber ketika dibebani penyearah 6-pulsa hasil implementasi lebih besar jika dibandingkan THD hasil simulasi. Hal ini dipengaruhi oleh akurasi pembacaan sensor arus.

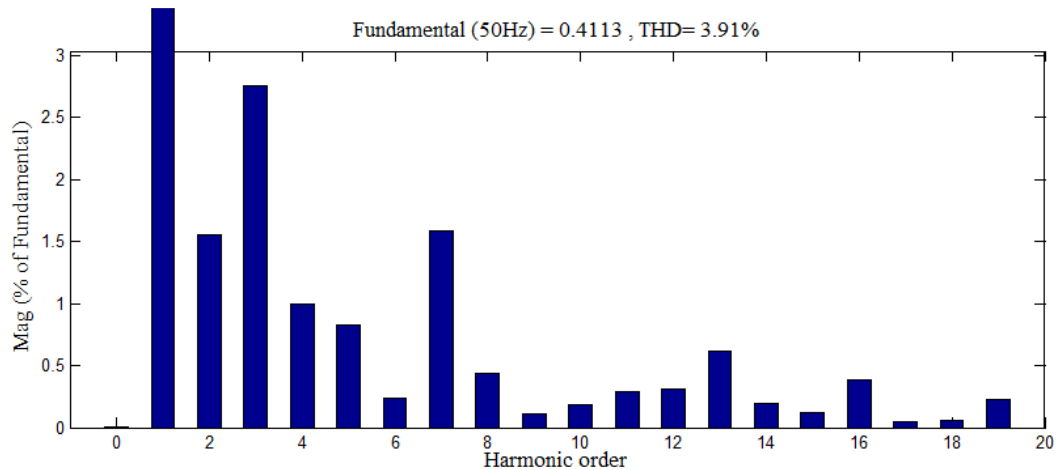


Gambar 4.8 THD arus sumber hasil implementasi sebelum dikompensasi

Bentuk gelombang arus sumber yang mengandung harmonisa seperti pada Gambar 4.7 kemudian diperbaiki dengan menambahkan arus referensi. Arus referensi merupakan arus harmonisa dengan tanda yang berlawanan sehingga jika arus referensi dan arus harmonisa dijumlahkan akan saling mengeliminasi. Gambar 4.9 merupakan bentuk gelombang arus sumber setelah dikompensasi. Chanel-1 pada Gambar 4.9 menunjukkan gelombang arus sumber yang telah dikompensasi. Chanel-2 pada Gambar 4.9 menunjukkan bentuk gelombang arus referensi yang diperoleh dengan perhitungan teori p-q.



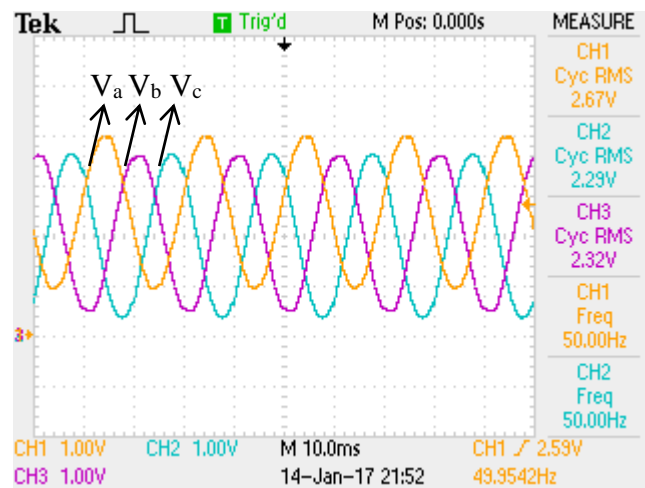
Gambar 4.9 Bentuk gelombang arus. Chanel-1 arus sumber setelah dikompensasi.
Chanel-2 arus referensi



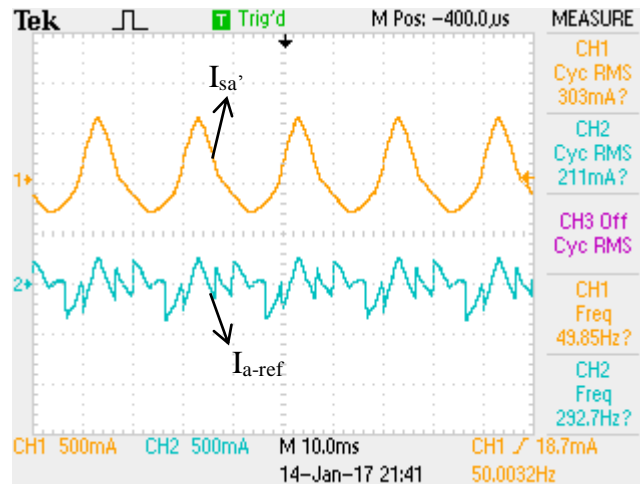
Gambar 4.10 THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi

Gambar 4.10 menunjukkan spektrum harmonisa arus sumber hasil implemementasi setelah dikompensasi. Dari Gambar 4.10 ini, dapat diketahui bahwa Nilai THD arus sumber turun menjadi 3.91% setelah dikompensasi.

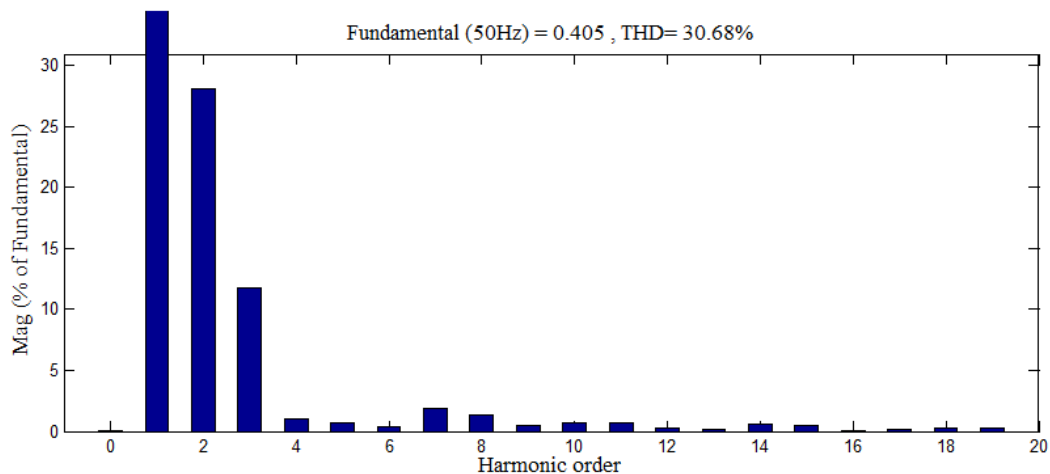
Pengujian juga dilakukan pada kondisi tegangan sumber tidak ideal untuk mengetahui pengaruh kondisi tegangan sumber terhadap arus referensi yang dibangkitkkan oleh teori p-q dalam memperbaiki harmonisa. Gambar 4.11 menunjukkan tegangan tiga fasa tidak seimbang. Gelombang tidak seimbang ini diperoleh dengan mengatur nilai *AC offset* pada sensor tegangan sehingga nilai puncak gelombang masing-masing fasa akan berbeda. Gelombang tiga fasa tidak seimbang ini akan digunakan sebagai sinyal masukan dalam perhitungan teori p-q.



Gambar 4.11 Gelombang tegangan tiga fasa tidak seimbang



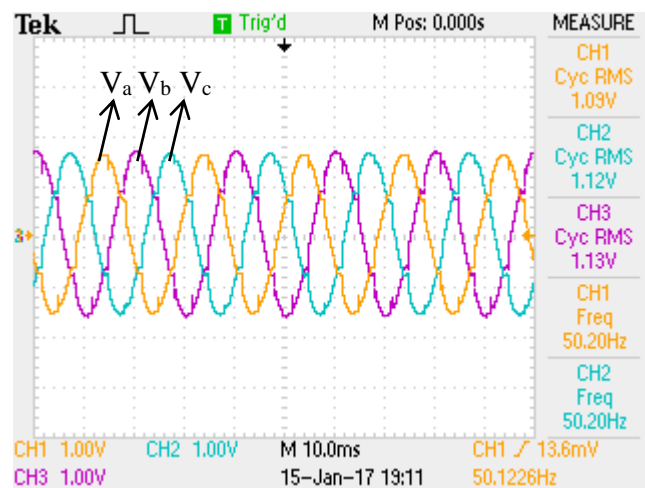
Gambar 4.12 Bentuk gelombang arus pada kondisi tegangan tidak seimbang.
Chanel-1 arus sumber setelah dikompensasi. Chanel-2 arus referensi



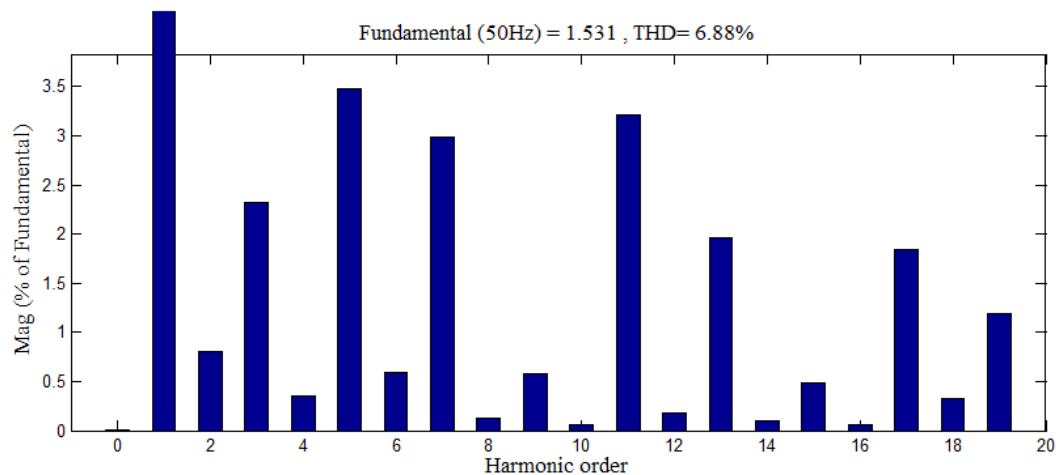
Gambar 4.13 THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi pada kondisi tegangan tidak seimbang

Gambar 4.12 menunjukkan hasil gelombang arus sumber setelah dikompensasi pada kondisi tegangan tidak seimbang. Bentuk gelombang arus yang dihasilkan setelah dikompensasi tidak berbentuk sinusoidal murni. Nilai THD arus sumber hasil implementasi pada kondisi tegangan tidak seimbang sebesar 30.68% seperti yang ditunjukkan Gambar 4.13. Nilai THD ini relatif lebih besar jika dibandingkan THD arus sumber pada kondisi tegangan ideal. Hal ini disebabkan arus referensi yang dibangkitkan oleh teori p-q tidak akurat dalam mengkompensasi arus harmonisa pada kondisi tegangan tidak seimbang.

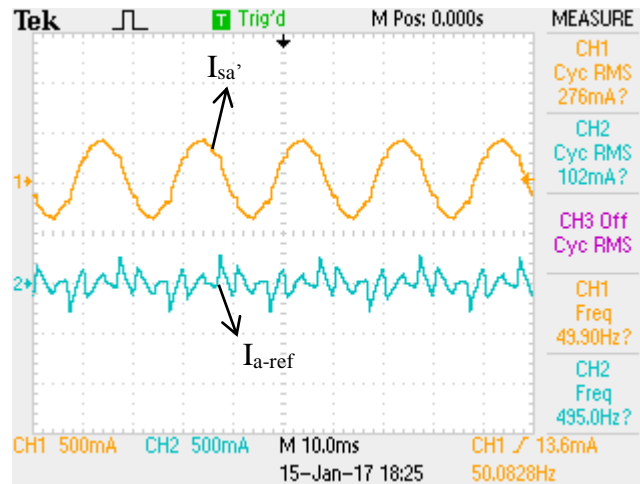
Pengujian yang terakhir adalah pada kondisi tegangan terdistorsi. Gambar 4.14 menunjukkan gelombang tegangan tiga fasa terdistorsi. Gelombang terdistorsi ini diperoleh dengan menambahkan induktor pada masing-masing fasa beban penyearah 6-pulsa. Induktor ini akan berpengaruh pada proses pensaklaran penyearah 6-pulsa sehingga akan menyebabkan tegangan sumber terdistorsi. Gelombang tegangan terdistorsi ini akan dijadikan masukan pada perhitungan teori p-q untuk membangkitkan gelombang arus referensi. Gambar 4.15 menunjukkan THD gelombang tegangan sumber yang terdistorsi.



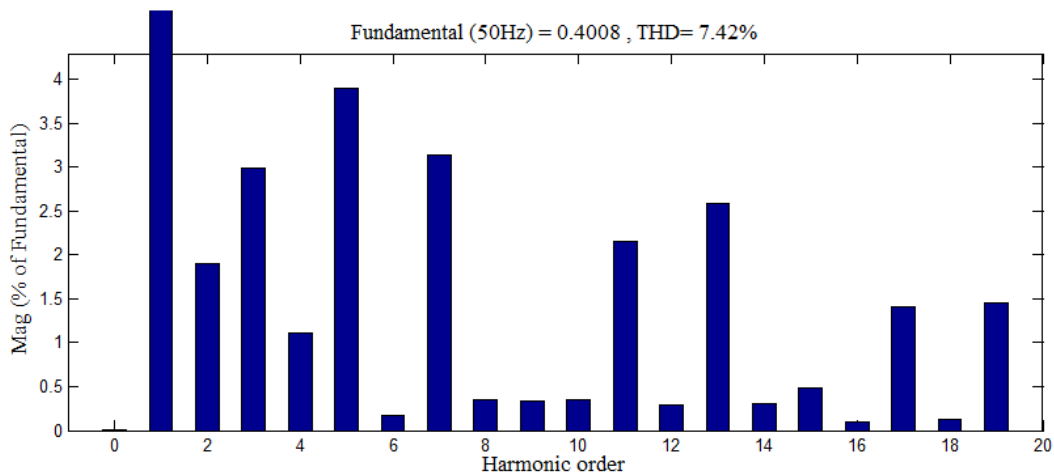
Gambar 4.14 Gelombang tegangan tiga fasa terdistorsi



Gambar 4.15 THD tegangan sumber yang terdistorsi



Gambar 4.16 Bentuk gelombang arus pada kondisi tegangan terdistorsi. Chanel-1 arus sumber setelah dikompensasi. Chanel-2 arus referensi



Gambar 4.17 THD arus sumber hasil implementasi setelah dikompensasi pada kondisi tegangan terdistorsi

Gelombang arus hasil kompensasi pada kondisi tegangan terdistorsi seperti ditunjukkan Gambar 4.16. Pada kondisi terdistorsi ini, arus sumber hasil kompensasi tidak berbentuk sinusoidal murni. Nilai THD arus sumber hasil kompensasi pada kondisi tegangan terdistorsi sebesar 7.42% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17. Arus referensi yang dibangkitkan teori p-q pada kondisi tegangan terdistorsi tidak secara akurat mengkompensasi gelombang arus harmonisa sehingga arus hasil kompensasi tidak berbentuk sinusoidal murni.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis terhadap data-data yang diperoleh dari simulasi dan implementasi, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode pengontrolan filter aktif dengan menggunakan teori p-q dapat menurunkan kandungan harmonisa dari 28.34% menjadi 2.26% pada simulasi rating yang digunakan.
2. Akurasi teori p-q dalam mengeliminasi harmonisa menurun pada kondisi simulasi tegangan tidak ideal.
3. Metode normalisasi sinyal tegangan dengan menggunakan PLL yang digunakan pada kondisi tegangan tidak ideal dapat mengeliminasi harmonisa dengan hasil THD mendekati simulasi pada kondisi tegangan ideal.
4. Pada sistem filter aktif terkopel fotovoltaik, THD arus sumber akan semakin besar jika injeksi daya aktif dari fotovoltaik menyebabkan arus sumber mendekati nol.

5.2 Saran

Ada beberapa saran yang perlu diperhatikan dalam mendesain filter aktif terkopel fotovoltaik pada kondisi tegangan tidak ideal antara lain :

1. Dalam implementasi rangkaian pembangkit sinyal referensi, pemilihan jenis komponen yang berkualitas dan spesifikasi yang sesuai perlu diutamakan.
2. Akurasi pembacaan sensor tegangan dan arus sangat berpengaruh pada sinyal referensi yang dibangkitkan. Oleh sebab itu, dibutuhkan sensor yang memiliki akurasi dan sensitivitas tinggi.
3. Pada simulasi rangkaian pembangkit sinyal referensi, sesuaikan beban dengan kemampuan dari komponen yang digunakan dalam rangkaian.
4. Kapasitas mikrokontroler STM32F4 untuk melakukan pengontrolan sistem secara keseluruhan tidak mencukupi, sehingga dibutuhkan pengolah sinyal dengan spesifikasi lebih besar lagi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

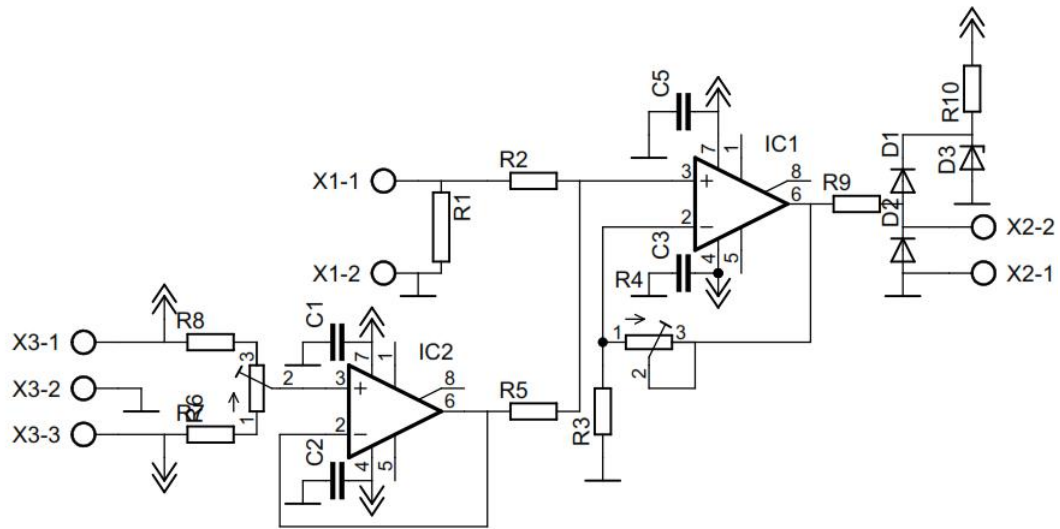
- [1]. Popescu, M. Bitoleanu, Alexandru. Suru, Vlad, “A DSP-Based Implementation of the – Theory in Active Power Filtering Under Nonideal Voltage Conditions,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 2, hal. 880-889, 2013.
- [2]. Petit, F. J. Robles, Guillermo. Amarís, Hortensia, “Current Reference Control for Shunt Active Power Filters Under Nonsinusoidal Voltage Conditions,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, hal. 2254-2261, 2007.
- [3]. P. C. Tan and Z. Salam, ”A new single-phase two-wire hybrid active power filter using extension p-q theorem for photovoltaic application,” in Proc. National Power and Energy Conference, PECon, Malaysia, hal. 126-131, 2004.
- [4]. Campanhol, L.B.G. da Silva, S.A.O. Sampaio, L.P. Junior, A.A.O., "A grid-connected photovoltaic power system with active power injection, reactive power compensation and harmonic filtering," Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian , vol., no., pp.642,649, 27-31 Oct. 2013.
- [5]. H. Akagi, "Active harmonic filters," Proceedings of the IEEE, vol. 93, pp. 2128-2141, 2005.
- [6]. Ping Yang, Jianping Xu, “A New Quadratic Boost Converter with High Voltage Step-up Ratio and Reduced Voltage Stress”, IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference-ECCE Asia, 2012
- [7]. Oswaldo Lopez-Santos, Martinez-Salamero, “Steady-State Analysis of Inductor Conduction Modes in the Quadratic Boost Converter” IEEE Transactions on Power electronics, vol. 32, no. 3, march 2017
- [8]. S. Chunhu, D. Mingjin, L. Jin, L. Bing, and Q. Shibao, “Active power filter design based on dual-DSP,” in Electricity Distribution (CICED), 2014 China International Conference on, pp. 333–335, Sept 2014.

- [9]. Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, no. 3, hal. 625–630, 1984.
- [10]. Karuppanan P and Mahapatra, Kamala Kanta "Shunt Active Power Line Conditioners for compensating harmonics and reactive power" IEEE conference on Environment and Electrical Engineering, hal. 277 – 280, 2010.
- [11]. STMicroelectronic, "User manual Discovery kit with STM32F407VG MCU", UM1472 datasheet, Feb. 2016.
- [12]. Aimagin. Waijung Blockset. Computer software. Waijung Blockset. Vers. 14.09c., 24 Sept. 2014. Web. 30 Sept. 2014.

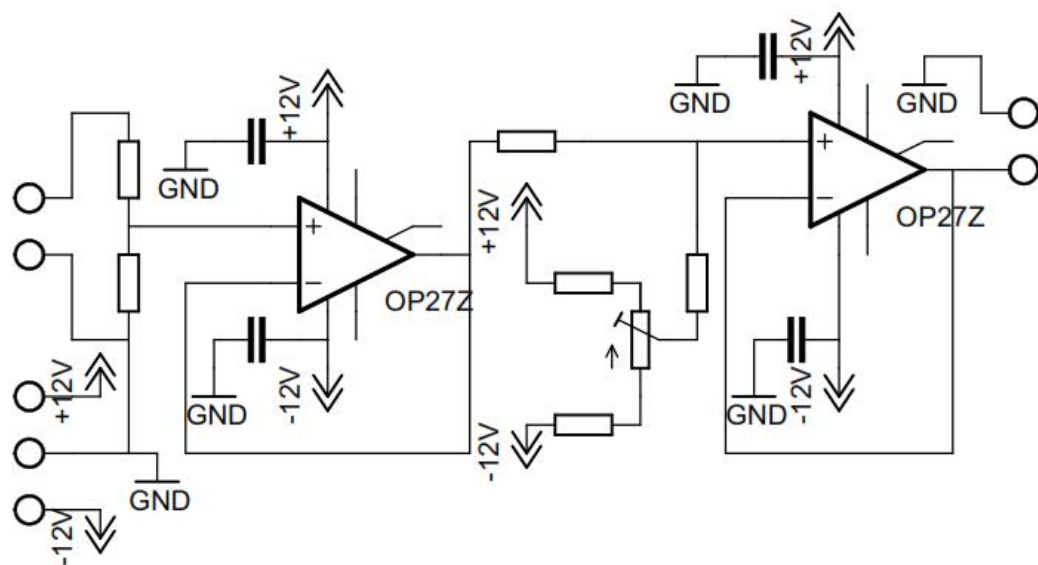
LAMPIRAN

A. Skematik rangkaian Sensor

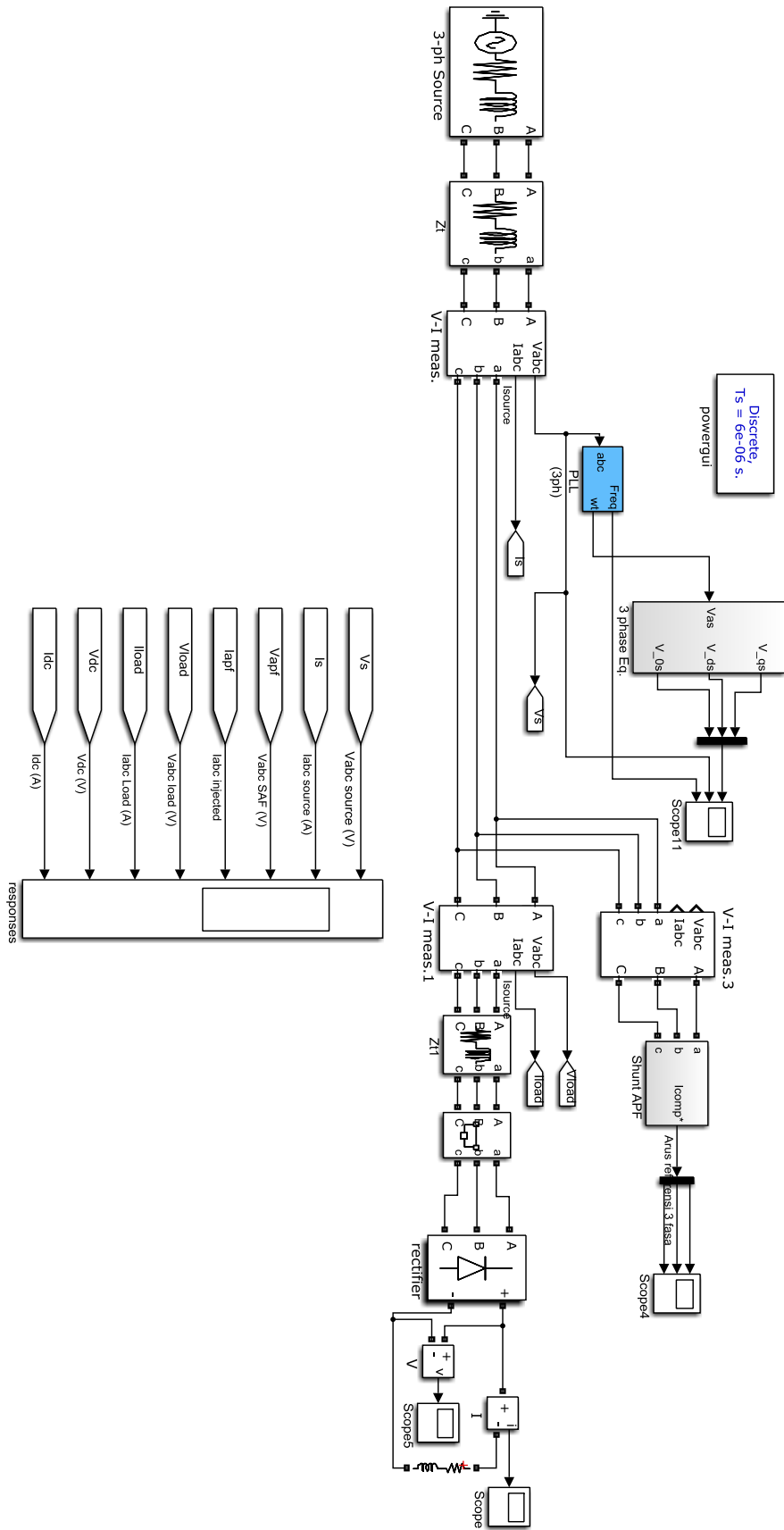
- Sensor Arus



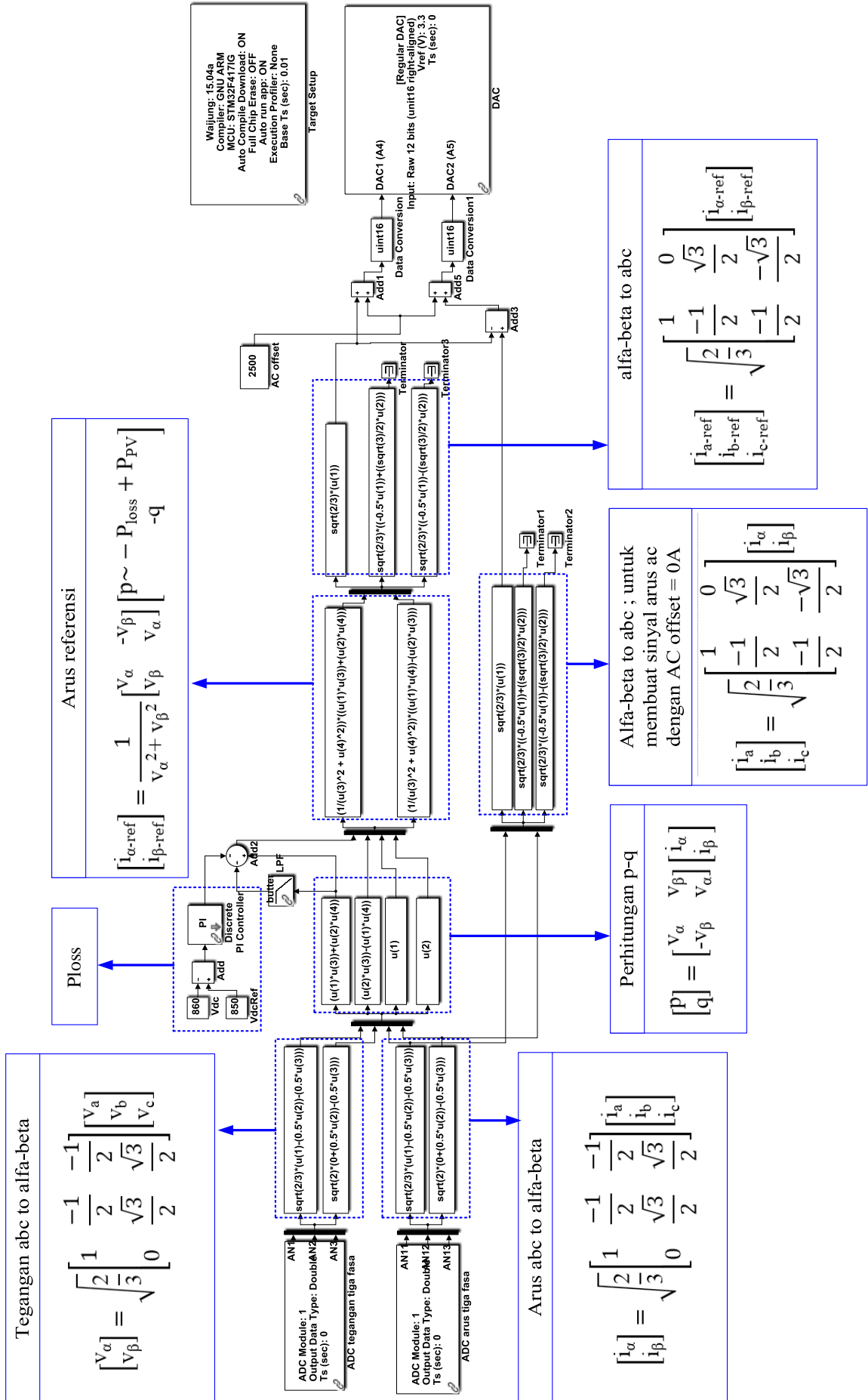
- Sensor Tegangan



B. Blok simulasi filter aktif terkopel fotovoltaik dengan simulink



C. Blok Pemrograman Teori p-q pada mikrokontroler STM32F4 menggunakan Simulink



Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEKS

A

AC offset, 33, 39
Active Power Filter, 1
akurasi teori p-q, 26
APF, 1, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19,
20, 21, 22, 23, 24, 26
APF+PV, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19,
21, 22, 23, 24, 26
arus harmonisa, 1, 27, 38
arus referensi, 2, 3, 8, 9, 10, 19, 21,
24, 27, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39,
40, 41, 42
arus sumber, 9, 18, 20, 21, 22, 23,
24, 25, 26, 27, 28, 30, 35, 36, 37,
38, 39, 40, 42, 43

B

beban tidak linier, 1, 5, 6, 36

D

daya aktif, 2, 3, 6, 9, 15, 27, 28, 29,
30, 43
daya reaktif, 5, 9, 15, 16

E

efektivitas, 2, 27, 30

F

Fast Fourier Transform, FFT, 16, 37
filter aktif, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 12, 14,
15, 27, 30, 32, 34, 35, 43
Filter aktif terkopel fotovoltaiik, 2, 6
Filter pasif, 1
fotovoltaiik, 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 14,
27, 28, 29, 30, 43

H

harmonisa, 1, 2, 5, 8, 9, 10, 13, 14,
17, 21, 23, 27, 34, 37, 39, 40, 43
hysteresis current control, 7

I

injeksi daya, 2, 3, 16, 27, 29, 30, 43

J

jala-jala, 1, 10, 15, 27, 29, 30

K

kompensasi, 1, 27, 36, 42
komponen fundamendal, 14
komponen harmonisa, 13, 14, 17
komponen negatif, 13
konverter DC-DC, 6
konverter kuadrat, 6, 7
koordinat abc , 8, 9
koordinat $\alpha\beta$, 8, 9

M

Maximum Power Point Tracking, 6
mikrokontroler, 2, 32, 33, 44
MPPT, 6

N

non-inverting adder, 33
normalisasi tegangan, 2, 21, 22, 24,
25, 26

P

penyearah 6-pulsa, 2, 35, 36, 37, 40
Phase Lock Loop, PLL, 12, 43
Point of Common Coupling, 6
PV, 1, 9, 12, 14, 15, 16, 19

R

Rugi daya, 9

S

sensor, 32, 33, 35, 36, 37, 39, 44

STM32F4, 2, 32, 33, 34, 44

T

tegangan ideal, 10, 13, 14, 17, 23,
26, 40, 43

tegangan referensi, 16

tegangan terdistorsi, 13, 23, 26, 41,
42

tegangan tidak ideal, 1, 2, 3, 10, 12,
13, 19, 43

tegangan tidak seimbang, 13, 19, 20,
21, 22, 40

teori p-q, 2, 3, 8, 9, 10, 12, 13, 19,
26, 27, 32, 33, 35, 38, 39, 40, 41,
42, 43

Total Harmonic Distorsion, THD,
16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24,
25, 26, 27, 28, 30, 37, 38, 39, 40,
41, 42, 43

Time sampling, 14, 33

transformasi *clarke*, 8

transformator arus (CT), 33

U

urutan negatif, 19

urutan positif, 13

V

Voltage Source Inverter, VSI, 5, 6, 7,
8, 9

W

waijung blok set, 33

BIOGRAFI PENULIS



Moh. Jauhari lahir di Sampang Jawa Timur pada tanggal 10 Agustus 1992. Penulis adalah anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan H. Hadrowi dan Hj. St. Amina. Penulis menempuh sekolah dasar di MI Darul Ijtihad Banyumas Sampang. Setelah 6 tahun, penulis melanjutkan sekolah pada yayasan yang sama, MTs Darul Ijtihad. Sampai akhirnya lulus, penulis meneruskan sekolahnya di MAN Pamekasan. Penulis melanjutkan

pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), jurusan Teknik Elektro dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan lulus pada tahun 2015. Setelah lulu dari S1, Penulis melanjutkan studi S2 di jurusan yang sama, Teknik elektro ITS. Penulis aktif melakukan penelitian di Laboratorium Konversi Energi Listrik. Penulis dapat dihubungi dengan email di bawah ini:

e-mail: jauhari11@mhs.ee.its.ac.id

Halaman ini sengaja dikosongkan